



PETRO- AND PALEOMAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE STRUCTURAL–MATERIAL COMPLEXES OF THE DIAMOND MINING OF THE NYURBINSKAYA PIPE (MIDDLE MARKHA DISTRICT, WEST YAKUTIA)

K. M. Konstantinov^{1,2}, A. A. Yakovlev¹, T. A. Antonova¹,
I. K. Konstantinov², Sh. Z. Ibragimov³, E. V. Artemova¹

¹Geo-Scientific Research Enterprise (NIGP) PJSC ALROSA, Mirny, Russia

²Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

³Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract: Modeling of physical and geological properties of a study object is an integral part of geological surveys at each stage. Without a model of physical and geological properties (PhGM) it is impossible to obtain a complete set of reflection indicators of an object in physical fields. The models are useful in solving a wide range of tasks on substantiation of survey methods and routines for interpreting the field data. Generally, a mineral deposit FGM contains the main elements represented by structural–material complexes (SMC) characterized by specific values of geometrical and physical parameters. We attempted at developing an PhGM of the diamond deposits controlled by the Middle Paleozoic trappe magmatism zone of the Vilyui paleoaulacogen. With this goal, in the period from 2002 to 2016, we carried out petrographic, paleomagnetic and geochemical studies of the SMC of the Nyurbinskaya pipe of Nakyn kimberlite field located in the Middle Markha district, West Yakutia. We studied terrigenous–carbonate rocks of the Late Cambrian of the Morkokinskaya and Oldondinskaya suites (ϵ_3mrk and ϵ_3-O_{1ol} , respectively), dolerites of the Vilyui–Markha intrusive complex (βPZ_{2vm}), autolithic kimberlite breccias of the Nakyn intrusive complex (αPZ_{2nk}), and sandstones of the Early Jurassic Ukugut suite (J_{1uk}). Important information was obtained on a wide range of petromagnetic parameters and paleomagnetism of the deposit SMC, elemental chemical composition of ferromagnetic minerals, and other data that can prove useful in discovering promising kimberlite sites in the Vilyui–Markha dike belt. The position of the paleomagnetic pole for the Late Cambrian of the Siberian Platform was clarified: latitude $\Phi = -35^\circ$, longitude $\Lambda = 136^\circ$, and confidence intervals $dp/dm = 3.5/6.9^\circ$. The poles were estimated for kimberlites ($\Phi = -11.5^\circ$, $\Lambda = 111.2^\circ$, $dp/dm = 3.5/7.5^\circ$) and pre-pipe basites ($\Phi = -14.6^\circ$, $\Lambda = 117.4^\circ$, $dp/dm = 3.7/7.1^\circ$). According to the Nyurbinskaya deposit PhGM developed on the basis of the paleomagnetic data, there was the Late Silurian – Early Devonian (S_2-D_1) stage of kimberlite- and trappe formation. The results of our study can enhance the prospects for discovering new primary diamond deposits on the Siberian platform.

Key words: Siberian platform; Vilyui paleoaulacogen; Vilyui–Markha dike belt; Middle Markha district; Nakyn kimberlite field; Nyurbinskaya pipe; Late Cambrian; Middle Paleozoic; kimberlite; dolerite; paleomagnetism; physical–geological model

RESEARCH ARTICLE

Recommended by S.V. Rasskazov (Guest Editor)

Received: November 7, 2016

Revised: December 20, 2016

Accepted: January 25, 2017

For citation: Konstantinov K.M., Yakovlev A.A., Antonova T.A., Konstantinov I.K., Ibragimov Sh.Z., Artemova E.V., 2017. Petro- and paleomagnetic characteristics of the structural–material complexes of the diamond mining of the Nyurbinskaya pipe (Middle Markha district, West Yakutia). *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (1), 135–169. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0235.

Для цитирования: Константинов К.М., Яковлев А.А., Антонова Т.А., Константинов И.К., Ибрагимов Ш.З., Артемова Е.В. Петро- и палеомагнитные характеристики структурно-вещественных комплексов месторождения алмазов трубка Нюрбинская (Средне-мархинский район, Западная Якутия) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 1. С. 135–169. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0235.

ПЕТРО- И ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ ТРУБКА НЮРБИНСКАЯ (СРЕДНЕМАРХИНСКИЙ РАЙОН, ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)

К. М. Константинов^{1,2}, А. А. Яковлев¹, Т. А. Антонова¹,
И. К. Константинов², Ш. З. Ибрагимов³, Е. В. Артемова¹

¹ АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация: Физико-геологические модели (ФГМ) являются неотъемлемой частью всех этапов геологоразведочных работ. Без формирования и исследования ФГМ невозможно получить целостную структуру признаков отражения поискового объекта в физических полях. Помимо этого, разработка такого рода моделей позволяет решать и обширный круг задач по обоснованию элементов методики работ, а также технологии интерпретации полевых материалов. Основными элементами строения ФГМ месторождений полезных ископаемых являются структурно-вещественные комплексы (СВК), характеризующиеся определенными значениями геометрических и физических параметров. С целью разработки ФГМ месторождений алмазов, контролируемых зоной среднепалеозойского траппового магматизма Вилуйского палеоавлакогена, в период с 2002 по 2016 г. проведены петро-, палеомагнитные и геохимические исследования СВК трубки Нюрбинской Накынского кимберлитового поля Среднемархинского района: терригенно-карбонатных пород позднего кембрия моркокинской ϵ_{3mrk} и олдондинской ϵ_{3-010l} свит, долеритов вилуйско-мархинского интрузивного комплекса βPZ_{2vm} , автолитовых кимберлитовых брекчий накынского интрузивного комплекса αPZ_{2nk} , а также песчаников ранней юры укугутской свиты J_{1uk} . В результате получена важная информация по широкому спектру петромагнитных параметров и палеомагнетизму СВК месторождения, элементному химическому составу ферромагнитных минералов и т.д., которую целесообразно использовать для обнаружения перспективных на присутствие кимберлитовых тел участков в пределах Вилуйско-Мархинского дайкового пояса. Исследованиями уточнен палеомагнитный полюс для позднего кембрия Сибирской платформы (широта $\Phi = -35^\circ$, долгота $\Lambda = 136^\circ$ и доверительные интервалы $dp/dm = 3.5/6.9^\circ$), а также рассчитаны полюсы по кимберлитам ($\Phi = -11.5^\circ$, $\Lambda = 111.2^\circ$, $dp/dm = 3.5/7.5^\circ$) и дотрубочным базитам ($\Phi = -14.6^\circ$, $\Lambda = 117.4^\circ$, $dp/dm = 3.7/7.1^\circ$). Разработанная на основе палеомагнитных данных динамическая ФГМ месторождения трубка Нюрбинская свидетельствует о существовании позднесилурийской – раннедевонской (S_2-D_1) эпохи кимберлитов и траппообразования, что расширяет перспективы обнаружения новых коренных месторождений алмазов на Сибирской платформе.

Ключевые слова: Сибирская платформа; Вилуйский палеоавлакоген; Вилуйско-Мархинский дайковый пояс; Среднемархинский район; Накынное кимберлитовое поле; трубка Нюрбинская; поздний кембрий; средний палеозой; кимберлиты; долериты; палеомагнетизм; физико-геологическая модель

1. ВВЕДЕНИЕ

Оперативность геологических прогнозов и поисков месторождений полезных ископаемых зависит от степени реалистичности модели их формирования. Довольно часто бывает так, что ясную картину строения и развития месторождения мы получаем только после его полной разработки, на которую уходят многие годы. Одним из таких наглядных примеров является кимберлитовая трубка Нюрбинская, расположенная в Накынском кимберлитовом поле (НКП) Среднемархинского района Западной Якутии (рис. 1). В настоящее время известны несколько взаимопротиворечащих друг другу геологических моделей месторождения трубки

Нюрбинская (рис. 2) [Kharkiv et al., 1998; Sablukov et al., 2008; Kostrovitsky et al., 2015; Tomshin et al., 2015; Gladkov et al., 2016]. Например, общим для моделей некоторых исследователей (рис. 2, А–В) является то, что кимберлитовая трубка сечется интрузией долеритов вилуйско-мархинского интрузивного комплекса βPZ_{2vm} мощностью более 250 м. На внедрение этой интрузии в консолидированные кимберлитовые породы трубки указывают два, как считается, «неоспариваемых» факта:

- образование зон метасоматически измененных кимберлитов мощностью 5–10 м [Kharkiv et al., 1998];
- отсутствие в кимберлитах ксенолитов среднепалеозойских долеритов (из основных пород в

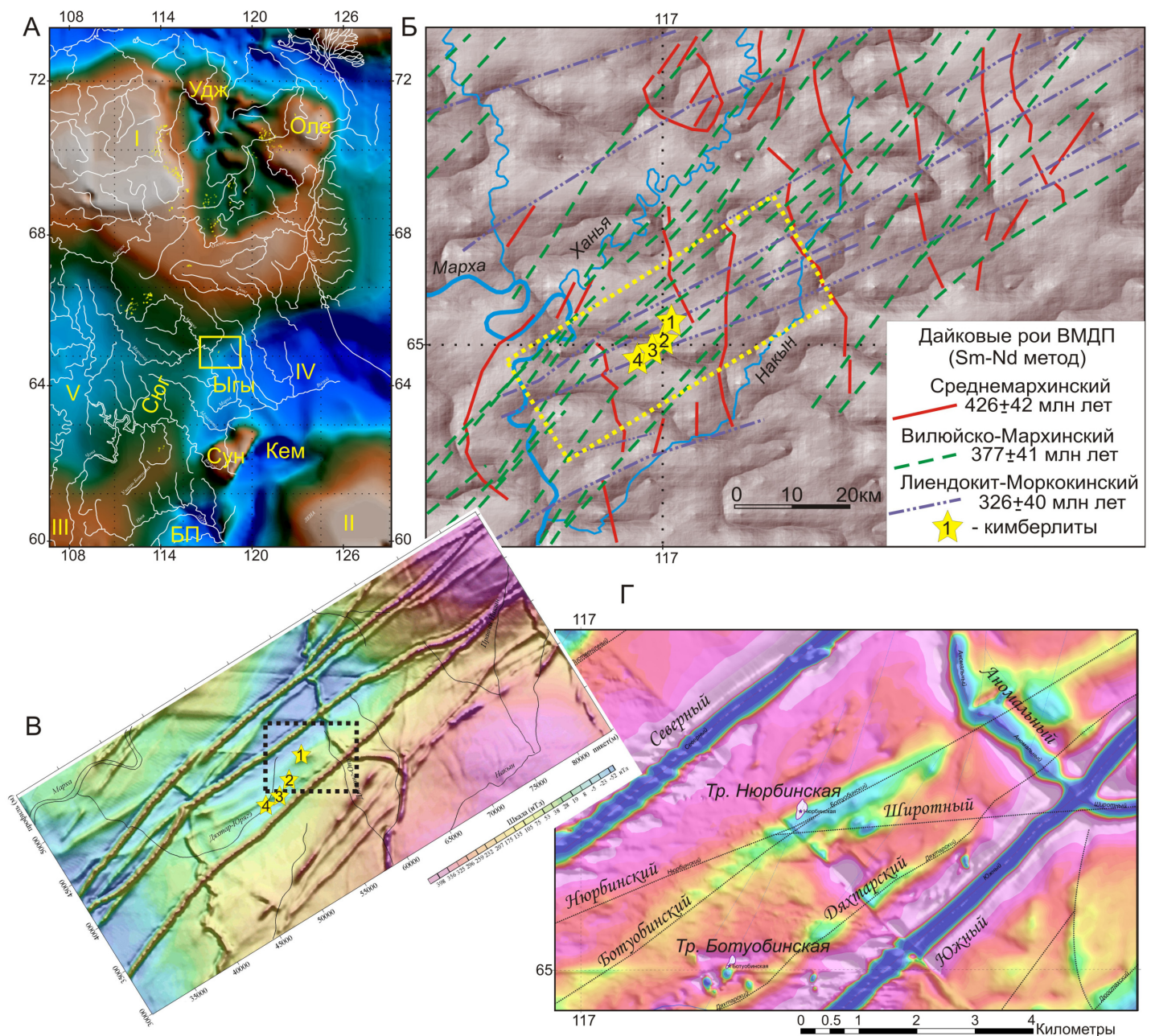


Рис. 1. Положение района работ на тектонической схеме восточной части Сибирской платформы (А), схеме развития кимберлитов и долеритов ВМДП по геолого-геофизическим данным (Б) [Mashchak, Naumov, 2004], картах локального (В) и аномального (Г) магнитных полей масштаба соответственно 1:25000 и 1:5000.

Структуры фундамента Сибирской платформы: первый порядок – антиклизы (I – Анабарская, II – Алданская, III – Непско-Ботубинская), синеклизы (IV – Вилуйская, V – Тунгусская); второй порядок – поднятия (Сун – Сунтарское, Оле – Оленекское, Удж – Уджинское, Сюг – Сюгджерское), впадины (БП – Байкало-Патомская, Кем – Кемпендяйская, Ыгы – Ыгыаттинская). Кимберлитовые тела: 1 – трубка Нюрбинская, 2 – трубка Ботубинская, 3 – тело Майское и 4 – рудопроявление Мархинское.

Fig. 1. Location of the surveyed area in the tectonic scheme of the eastern Siberian platform (A), the scheme showing the development of kimberlites and dolerites in the Vilyui-Markha dike belt from the geological and geophysical data (B) [Mashchak, Naumov, 2004], and maps of local (B) and anomalous (Г) magnetic fields (scale 1:25000 and 1:5000, respectively).

Structures of the Siberian platform: first order – anteclines (I – Anabar, II – Aldan, III – Neya-Botuoba), synclines (IV – Vilyui, V – Tunguska); second order – uplifts (Сун – Suntar, Оле – Olenyek, Удж – Udzha, Сюг – Syugdzher), depression (БП – Baikal-Patom, Кем – Kempendyai, Ыгы – Ygyatta). Kimberlite bodies: 1 – Nyurbinskaya pipe, 2 – Botuobinskaya pipe, 3 – Maiskoe body, 4 – Markha ore occurrence.

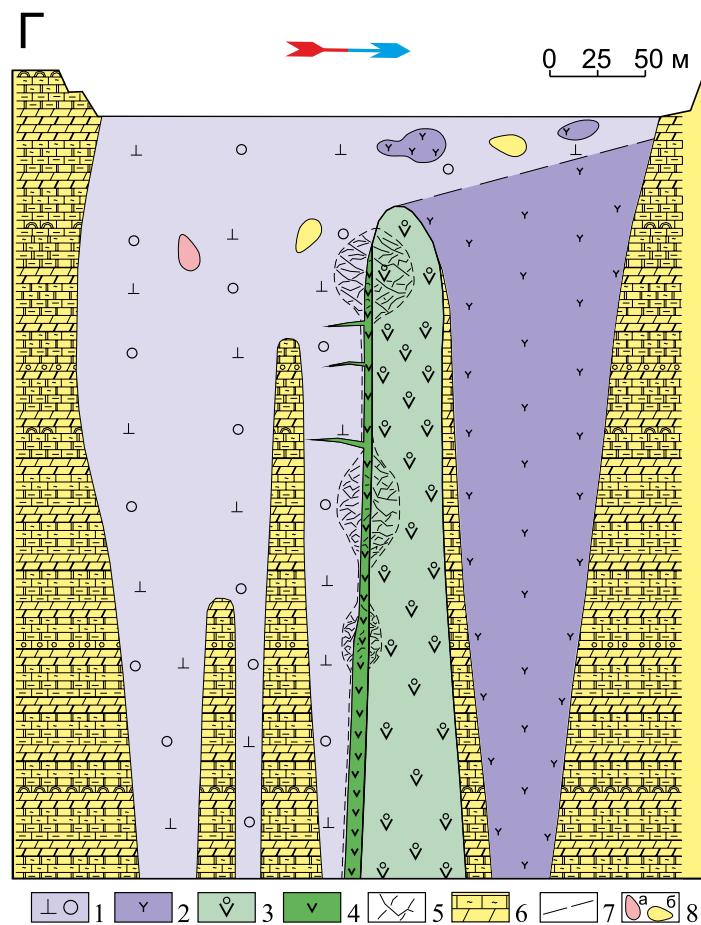
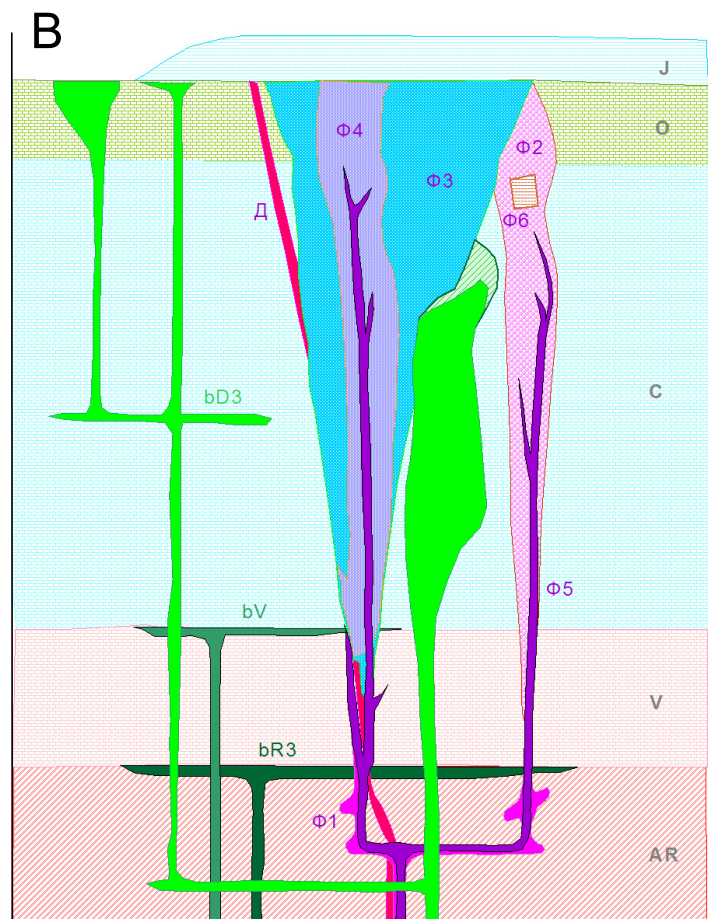
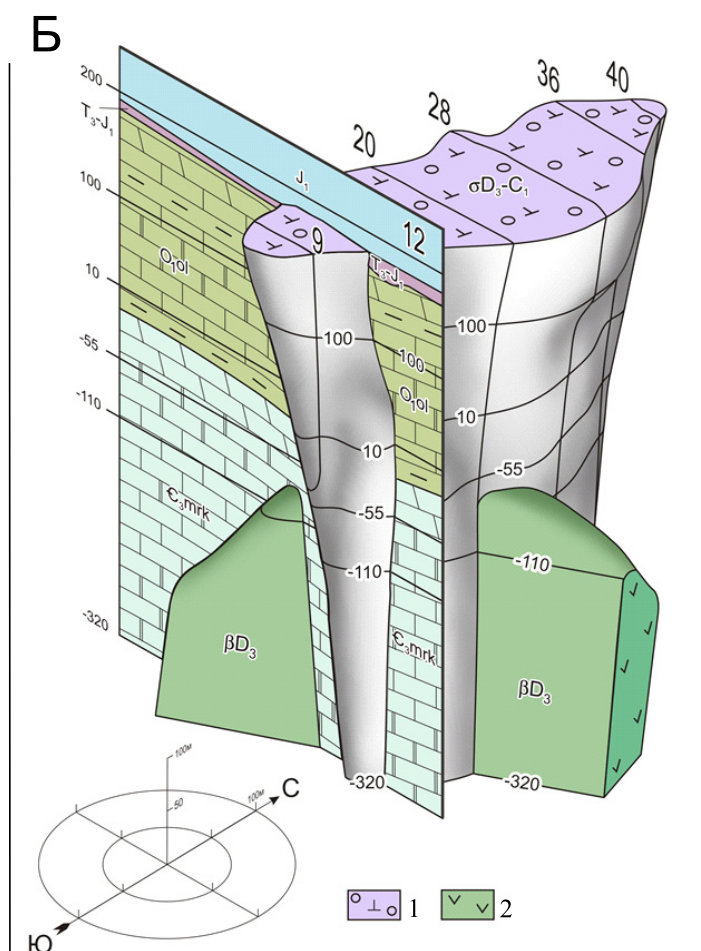
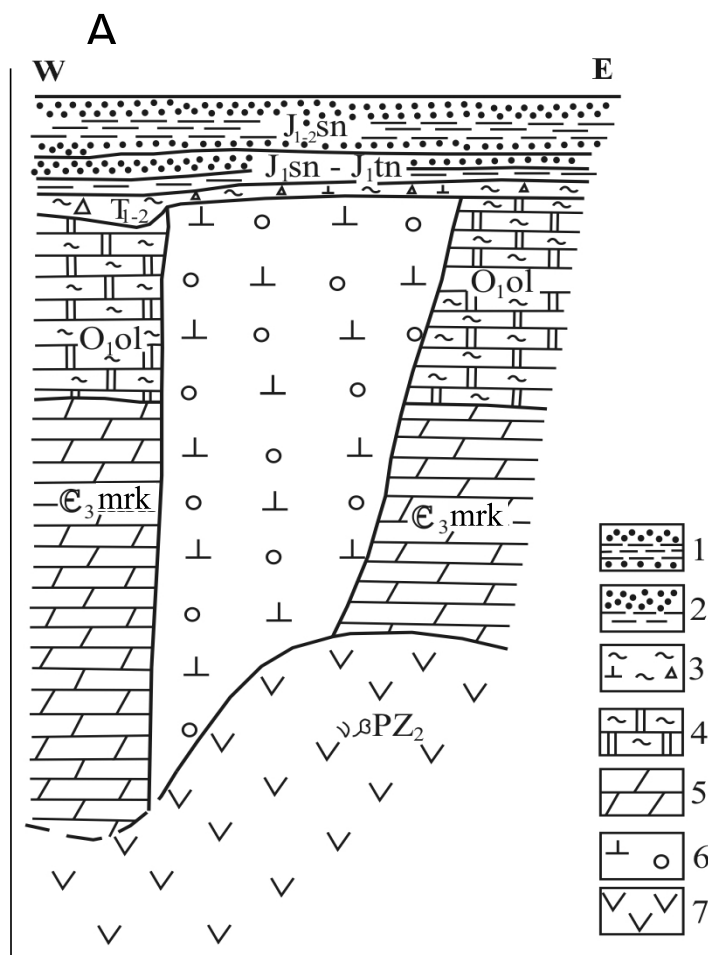


Рис. 2. Модели геологического строения месторождения алмазов трубка Нюрбинская.

А – геологический разрез по [Kharkiv et al., 1998]: 1–3 – перекрывающие породы мезозоя: 1 – аргиллиты, алевролиты, песчаники сунтарской свиты, 2 – песчаники, алевролиты тунгской и укугутской свит (нерасчлененные), 3 – карбонатные глины со щебнем доломитов, кимберлитов, интенсивно выветрелые алевролиты средневерхнетриасовые; 4–5 – вмещающие породы: 4 – доломиты с прослоями плоскогалечных конгломератов, известняков и алевролитов олдондинской свиты, 5 – известняки, мергели, доломиты с прослоями песчаников и аргиллитов моркокинской свиты; 6 – автолитовые кимберлитовые брекчии; 7 – посттрубочные долериты. *Б* – 3D-модель по [Kostrovitsky et al., 2015]: 1 – кимберлиты; 2 – посттрубочные долериты. *В* – схематический геологический разрез по [Sablukov et al., 2008]: Д – дотрубочная дайка; Ф1 – фаза 1, крупнопорфировый кимберлит; Ф2 – фаза 2, эруптивная брекчия кимберлитов; Ф3 – фаза 3, туффизит и ксенотуффизит кимберлитов; Ф4 – фаза 4, ксенокластолава кимберлитов; Ф5 – фаза 5, крупнопорфировый кимберлит; Ф6 – фаза 6, эпикластические породы кратерной фации; bD3 – посткимберлитовые базиты; bV и bR3 – докимберлитовые базиты. *Г* – схематический геологический разрез по [Tomshin et al., 2015]: 1 – АКБ; 2 – ПК; 3 – долериты дотрубочной дайки; 4 – посттрубочные (щелочные) базиты; 5 – брекчированные породы; 6 – вмещающие породы раннего палеозоя; 7 – предполагаемые границы; 8 – ксенолиты мантийные (а) и коровые (б).

Fig. 2. Models showing the geological structure of the Nyurbinskaya pipe.

A – geological section after [Kharkiv et al., 1998]: 1–3 – Mesozoic overlying rocks: 1 – argillite, aleurolite, and sandstone of the Suntar suite, 2 – sandstone and aleurolite of the Tyungksa and Ukugut suites (unseparated), 3 – carbonate clay with crushed dolomite and kimberlite, and intensely weathered aleurolite of the Middle Triassic; 4–5 – host rocks: 4 – dolomite interbedded with flat-pebble conglomerate, limestone and aleurolite of the Oldonda suite, 5 – limestone, marl, and dolomite interbedded with sandstone and argillite of the Morkokin-skaya suite; 6 – autolithitic kimberlite breccia; 7 – post-pipe dolerite. *B* – 3D model after [Kostrovitsky et al., 2015]. 1 – kimberlite, 2 – post-pipe dolerite. *C* – schematic geological section after [Sablukov et al., 2008]: Д – pre-pipe dike; Ф1 – phase 1, large-porphyre kimberlite; Ф2 – phase 2, eruptive breccia of kimberlite; Ф3 – phase 3, tuffizite and xenotuffizite of kimberlite; Ф4 – phase 4, kimberlite xenoclast lava; Ф5 – phase 5, large-porphyre kimberlite; Ф6 – phase 6, epiclastic crater facies; bD3 – post-kimberlite basite; bV and bR3 – pre-kimberlite basites. *G* – schematic geological section after [Tomshin et al., 2015]: 1 – АКБ; 2 – ПК; 3 – dolerite in pre-pipe dike; 4 – post-pipe (alkaline) basite; 5 – brecciated rocks; 6 – Early Paleozoic host rocks; 7 – assumed boundaries; 8 – mantle (a) and crust (b) xenoliths.

кимберлитах встречены ксенолиты докембрийского возраста 537 ± 13 и 703.8 ± 82 млн лет, определенное по К-Аг изохроне [Sablukov et al., 2008]).

Однако на это имеются два контраргумента. Во-первых, вызывает сомнение несоответствие масштаба вещественных изменений кимберлитов мощности рвущей их дайки долеритов [Zinchuk et al., 2002]. Для вышеуказанной ситуации зоны скарирования должны распространяться на более обширные расстояния. Естественно, изменения вещественного состава будут регистрироваться в значениях петрофизических параметров – плотностных, магнитных и пр., аналогично установленным в отторженце кимберлитов трубки Комсомольская [Konstantinov et al., 2004]. Во-вторых, отсутствие в кимберлитах ксенолитов основных пород среднего палеозоя может объясняться особенностями строения (обтеканием одних тел другими вдоль геологических границ) и иной последовательностью внедрения магматических тел разных объемов (рис. 2, Г) [Tomshin et al., 2015]. Это может привести к нарушению изотопной системы ксенолитов и, как следствие, ошибке абсолютного датирования.

В сложившейся неоднозначной ситуации огромную помощь в разработке корректной модели месторождения алмазов трубка Нюрбинская могут оказать петро- и палеомагнитные исследования, которые позволят не только получить физические характеристики структурно-вещественных комплексов (СВК), но и расшифровать историю геоло-

гических процессов по содержащейся в них магнитной записи («ископаемый» магнетизм) [Khramov et al., 1982]. Созданные на палеомагнитной основе физико-геологические модели (ФГМ) относятся к разряду динамических, поскольку рассматривают трансформирование физических характеристик какого-либо геологического объекта (например, палеомагнитных полюсов террейна и т.п.) во времени [Vakhromeev, Davydenko, 1989; Zhitkov, 1995; Konstantinov, 1998]. Актуальность постановки петро- и палеомагнитных исследований СВК месторождения трубка Нюрбинская заключается в разработке динамической ФГМ, которая будет служить ключом к обоснованию стратегии прогноза и поисков коренных месторождений алмазов в Западной Якутии. В статье приводятся петромагнитные характеристики основных СВК трубки Нюрбинской, полученные с 2002 г. по апрель 2016 г. включительно, т.е. за 14 лет кропотливого изучения.

2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Среднемархинский район Западной Якутии, к которому приурочено месторождение алмазов трубка Нюрбинская, находится в области сочленения трех крупных структур Сибирской платформы: Анабарской антеклизы, Вилюйской и Тунгусской синеклиз (см. рис. 1, А). Кимберлитовая трубка

Нюрбинская, как и кимберлитовая трубка Ботуобинская, тело Майское и рудопоявление Мархинское, расположена на водоразделе рек Ханья и Накын и контролируется среднепалеозойскими интрузиями Вилуйско-Мархинского дайкового пояса (ВМДП), который имеет достаточно сложное строение и историю становления (см. рис. 1, Б) [Masaitis et al., 1975; Levashov, 1975; Gaiduk, 1988; Tomshin et al., 1998, 2004; Tomshin, 2000; Mashchak, Naumov, 2004]. По ряду признаков кимберлиты НКП отличаются от всех известных до сих пор в Западной Якутии кимберлитов и близки таковым Южной Африки [Cherny et al., 1998; Kornilova et al., 2001; Pokhilenko et al., 2000; и др.]. Отличия могут зависеть от разных факторов: эпохи внедрения, степени агрессивности кимберлитовой магмы, длительности эволюции и динамики ее подъема, мощности и строения литосферы террейна и др.

Несмотря на достаточно продолжительные геолого-геофизические исследования, проблема возрастного взаимоотношения и последовательности формирования кимберлитов НКП и базитов ВМДП до сих пор не решена однозначно. Например, изотопные определения дают оценку возраста проявления кимберлитового магматизма НКП в интервале значений 330–450 млн лет [Agashev et al., 1998, 2004; Shamshina, Zaitsev, 1998; Zaitsev et al., 2001; Zaitsev, Smelov, 2010], что может объясняться гибридной природой кимберлитов и наличием в них продуктов более поздних процессов. В то же время в ксенолитах осадочных пород из кимберлитов определены силурийские брахиоподы, конодонты раннего и среднего ордовика, раннего силура и девона [Shatalov et al., 1999], что дает основание говорить о послераннедевонском возрасте кимберлитов и ограничивает нижний предел внедрения трубки Нюрбинской 400 млн лет.

Развитие траппов (даек, силлов, покровов) ВМДП происходило, очевидно, при формировании Вилуйского палеоавлакогена в силуре – раннем карбоне [Masaitis et al., 1975; Mashchak, Naumov, 2004; Courtillot et al., 2010; Kiselev et al., 2014; Tomshin et al., 2016]. На территории НКП тела базитов контролируются тремя системами разломов – Среднемархинской, Вилуйско-Мархинской и Лиендокит-Моркокинской, соответственно, субмеридионального, северо-восточного и субширотного простирания (см. рис. 1, Б). Возраст приуроченных к ним интрузий базитов, согласно Sm-Nd и K-Ar определениям, соответствует позднему силуру (426 ± 42 млн лет), позднему девону (377 ± 41 млн лет) и среднему карбону (326 ± 42 млн лет) [Mashchak, Naumov, 2004]. Большинство даек долеритов относятся к «слепым» (рис. 3), но, являясь высокоплотными и высокомагнитными образованиями, они четко прослеживаются в потенциальных геофизических по-

лях разной интенсивности (см. рис. 1, В, Г) [Matrosov, 2005]. Однако попытка идентифицировать дайковые рои ВМДП по генерируемым ими магнитным аномалиям так и не увенчалась успехом. Практика поисковых работ на алмазы в районах развития пород трапповой формации показывает, что интерпретация данных магниторазведки возможна только на основе разработки петромагнитной легенды базитов ВМДП.

В генерализованном виде определена следующая последовательность становления всех магматических образований ВМДП, охватывающих период от раннего силура до раннего карбона включительно: интрузии → эффузивные образования апайнской свиты (фран) → сложно дифференцированные интрузии с анортозитовыми габбро-долеритами → кимберлиты → щелочные базиты → эксплозивные брекчии [Zemnukhov et al., 2005]. Однако не исключено, что в его пределах внедрение кимберлитов могло происходить и в более древние эпохи, например в позднесилурийско-раннедевонскую (S_2 – D_1) [Brahfogel, 1984], поэтому вполне вероятно, что кимберлиты могут ассоциировать не с одним, а с несколькими из указанных выше петротипов среднепалеозойских базитов (например, аналоги трубок Мир и Нюрбинская [Konstantinov et al., 2016a; Yakovlev et al., 2016]). В этой связи решение задачи петромагнитного картирования дайковых роев с целью оконтуривания магниторазведкой перспективных на кимберлиты участки в составе ВМДП также является весьма актуальным для наших исследований.

Анализ геологической ситуации [Tomshin et al., 1998, 2004, 2015] показал, что основное тело Нюрбинской трубки сформировано в две фазы (рис. 2, Г). Первоначально, в субвулканическую фазу, внедрились порфиновые кимберлиты (ПК), а затем, во вторую (вулканическую) фазу, – автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ), практически полностью слагающие верхнюю часть трубки. Последние содержат многочисленные разноразмерные (от 5–10 см до 7–10 м) обломки ПК. Между долеритами и кимберлитами сохранился разделяющий их блок осадочных пород. Логично предположить, что после становления Нюрбинской дайки вдоль ее северо-западного борта произошло внедрение ПК. Затем вдоль юго-восточного борта дайки формировались АКБ, образующие многоканальное тело, частично контактирующее с долеритами. После становления трубки вдоль контакта между АКБ и долеритовой дайкой внедрилось маломощное тело щелочных базитов. Последние имеют горячий контакт с долеритами, а также оказывали термальное воздействие на кимберлиты. Особенно ярко последнее проявилось на фронте внедрения. Формировавшиеся впоследствии вдоль этой контактовой

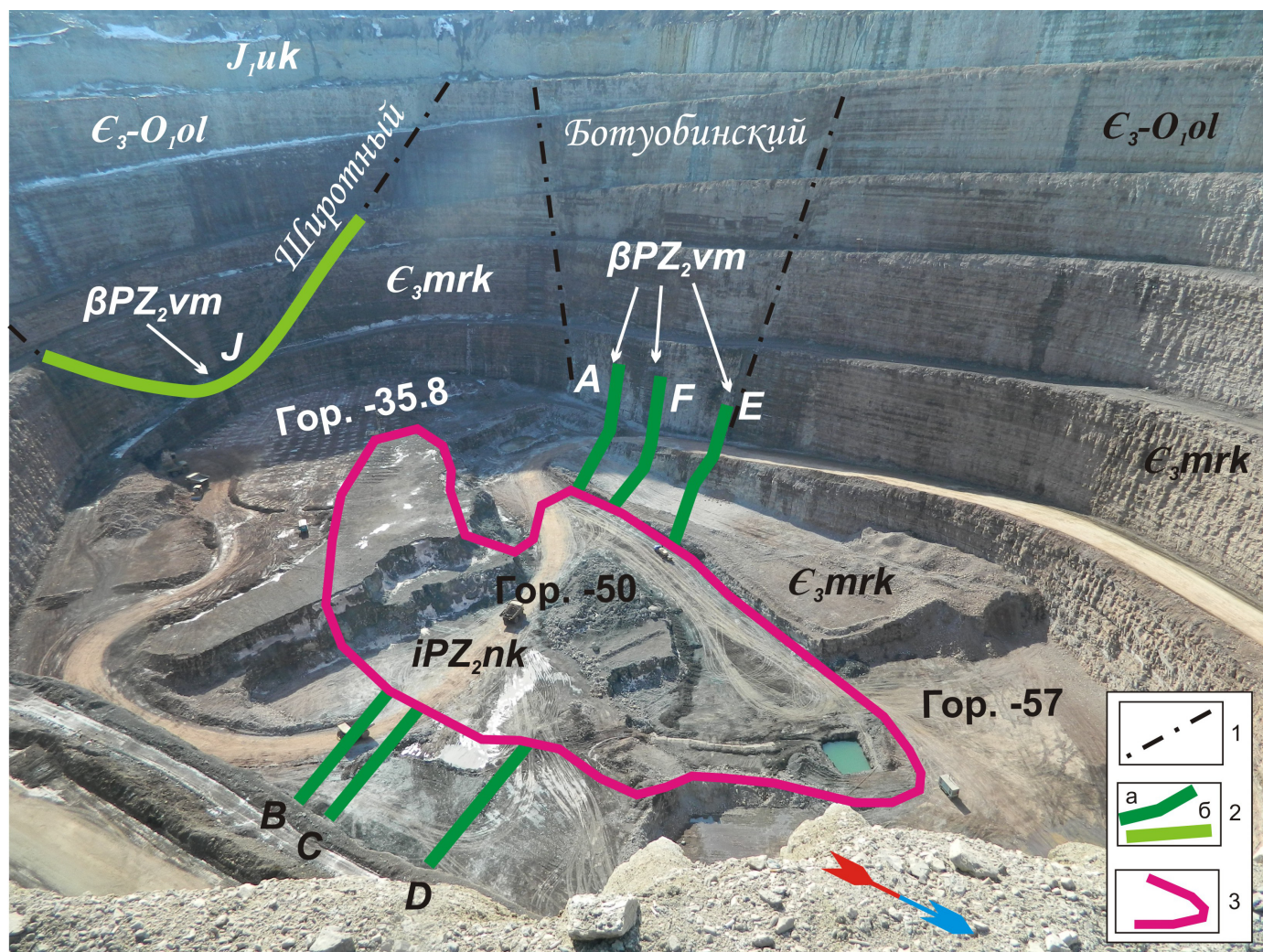


Рис. 3. Общий вид карьера месторождения трубка Нюрбинская (апрель 2016 г.) с элементами геологического дешифрирования.

1 – зоны разломов; 2 – дайки вилуйско-мархинского интрузивного комплекса (а – дотрубочные и б – неопределенного возраста); 3 – контур кимберлитовой трубки. Фото К.М. Константинова.

Fig. 3. General view of the Nyurbinskaya pipe quarry (April 2016), and elements of geological interpretation.

1 – fault zone; 2 – dike of the Vilyui-Markha intrusive complex (a – pre-pipe; б – unknown age); 3 – contour of the kimberlite pipe. Photo by K.M. Konstantinov.

зоны взрывчатые брекчии развивались по базитам и кимберлитам и метасоматически преобразовали их, образуя сложную кимберлит-базитовую брекчированную породу. Именно изучение этих пород послужило основанием говорить о наличии ксенолитов траппов в кимберлитах трубки Нюрбинской [Kiselev et al., 2004; Sablukov et al., 2008].

Таким образом, трубку Нюрбинскую (см. рис. 1, Б, рис. 2) можно рассматривать в качестве уникального объекта для расшифровки парастерической связи кимберлитового и базитового магматизма с целью установления поисковых критериев коренных месторождений алмазов в пределах рудоконтролирующего ВМДП. Поскольку магнито-

разведка – один из основных геофизических методов поисков месторождений алмазов на территории Западной Якутии, получение петромагнитных характеристик СВК для интерпретации ее материалов является важной задачей настоящих исследований.

3. МЕТОДИКА РАБОТ

Объекты исследования. Изученные СВК месторождения трубка Нюрбинская представлены АКБ накынского интрузивного комплекса iPZ_{2nk} , долитами вилуйско-мархинского интрузивного ком-

плекса βPZ_{2vm} , вмещающими терригенно-карбонатными породами моркокинской ϵ_3mrk и олдондинской ϵ_3-O_{1ol} свит позднего кембрия – раннего ордовика и перекрывающими песчаниками укугутской свиты J_{1uk} ранней юры (см. рис. 2, рис. 3). Ориентированные образцы отбирались в современной системе координат с помощью горного компаса¹ [Khramov et al., 1982]. Для этой цели выбирались обнажения только с ненарушенным взрывными работами залеганием горных пород (рис. 4). Изученный интервал составил ≈ 300 м (с горизонта +250 до горизонта –57, здесь и далее абсолютные отметки), а количество образцов – около 400 штучков, из которых выпиливались по 2–3 кубика с ребром 20 мм.

АКБ (рис. 4, Б) представляют собой мелкосреднепорфировые породы зеленовато- или голубовато-серого цвета [Kharkiv et al., 1998]. В целом кимберлитовые породы НКП характеризуются высокой степенью изменения, обусловленной различными геологическими процессами. Они также имеют повышенную степень гибридности в связи с обилием обломков осадочных, метаморфических и, в меньшей мере, мантийных пород. Содержание мелких обломков вмещающих пород варьируется от 5 до 18 %. Ксенолиты метаморфических пород (рис. 4, В) распределены в кимберлитах трубки неравномерно, содержание их колеблется в пределах 1–10 %. Ксенолиты мантийных пород (эклогиты, гранатопы серпентиниты, пироксениты и глиммериты-слюдиты) встречаются крайне редко (около 0.1 %). Практическое отсутствие ксенолитов дотрубочных субщелочных долеритов, вероятно, объясняется тем, что кровля их интрузии вначале была срезана ПК, которые позднее были распылены АКБ [Tomshin et al., 2015; Yakovlev et al., 2016]. Палеомагнитные исследования ксенолитов ставились с целью доказательства природы характеристических компонент естественной остаточной намагниченности (ЕОН, **In**) кимберлитов на основе теста «конгломератов»².

До настоящего времени в Западной Якутии был известен единственный достоверно установленный «прорыв» дайки долеритов вилюйско-мархинского интрузивного комплекса кимберлитами трубки Мир в Малоботуобинском районе [Kharkiv et al., 1998], возраст которой принят как поздний девон – ранний карбон D_3-C_1 (граница фаменского и турнейского ярусов, ≈ 360 млн лет) [Zaitsev, Smelov,

2010]. По этой дайке долеритов получен абсолютный возраст 373.5 ± 3.9 млн лет [Tomshin et al., 2016] и палеомагнитное определение [Konstantinov et al., 2016a], которое согласуется с палеомагнитным полюсом аппаинской свиты позднего девона D_3ap (франский ярус, 385–375 млн лет) [Konstantinov et al., 2015, 2016b]. В 2014 г. в Среднемархинском районе в карьере кимберлитовой трубки Нюрбинской также вскрыты три дотрубочные дайки долеритов мощностью от 3 до 7 м (см. рис. 3, рис. 4, Д, Е), которые прорывают породы моркокинской свиты, но, в свою очередь, срезаются Ботуобинским разломом. Собственно в кимберлитовом теле дайки долеритов не прослеживаются. Выше нулевого горизонта дайки выклиниваются и переходят в зоны дробления в карбонатном цоколе. Весьма вероятно, что подобные дотрубочные дайки долеритов могут являться кимберлитораспределяющими в составе ВМДП, поэтому присутствие таких даек логически следует рассматривать в качестве одного из косвенных поисковых признаков и предпосылок, повышающих вероятность обнаружения кимберлитовых тел на участках их развития. Таким образом, изучение дотрубочных даек долеритов и получение по ним петромагнитных характеристик с целью интерпретации магнитных полей может оказаться весьма перспективным решением задачи локального прогноза месторождений алмазов в пределах ВМДП.

Дотрубочные дайки долеритов изучались в сайтах А, В, С, D1, D2, Е и F (см. рис. 3, рис. 4, Д, Е). Дальнейшие вскрышные работы показали, что дайки являются апофизами залегающего ниже интрузивного массива (см. рис. 2). Образцы сайта А непосредственно представляют контакт с кимберлитовой трубкой в юго-западном борту карьера. Сайты D1 и D2 принадлежат одной дайке D, отобранной на горизонтах, соответственно: –5 и –12.5 северо-восточного борта карьера. В 30 м южнее от нее, на горизонте –12.5, также изучены две отдельные дайки – сайты В и С. В отличие от «мирнинской» дайки, абсолютный возраст изученных дотрубочных даек не установлен.

Долериты ВМДП, без видимого взаимоотношения с кимберлитами, отобраны из хонолита р. Лиендокит в трех обнажениях (сайт L, рис. 4, Г), даек Широкого (сайт J, рис. 4, Ж) и Южного (сайт N, см. рис. 3 в [Konstantinov et al., 2016b]) разломов.

Породы терригенно-карбонатного комплекса моркокинской ϵ_3mrk и олдондинской ϵ_3-O_{1ol} свит (см. рис. 3, рис. 4, А, Г) изучались с целью уточнения позднекембрийского (490–500 млн лет) палеомагнитного полюса Сибирской платформы [Konstantinov et al., 2011], а также получения информации о геофизических эффектах и масштабах развития зон эпигенетических изменений, вызванных, например,

¹ Отбор сильномагнитных горных пород (долеритов) проводится с постоянным контролем магнитного склонения.

² Тест конгломератов (галеков) Грэхема [Graham, 1949] – способ оценки палеомагнитной стабильности по степени хаотичности распределений векторов ЕОН и ее компонент в обломках (гальках) из конгломератов, брекчий, туфов и т.п. пород [Pechersky, Sokolov, 2010]. В нашем случае – кимберлиты.

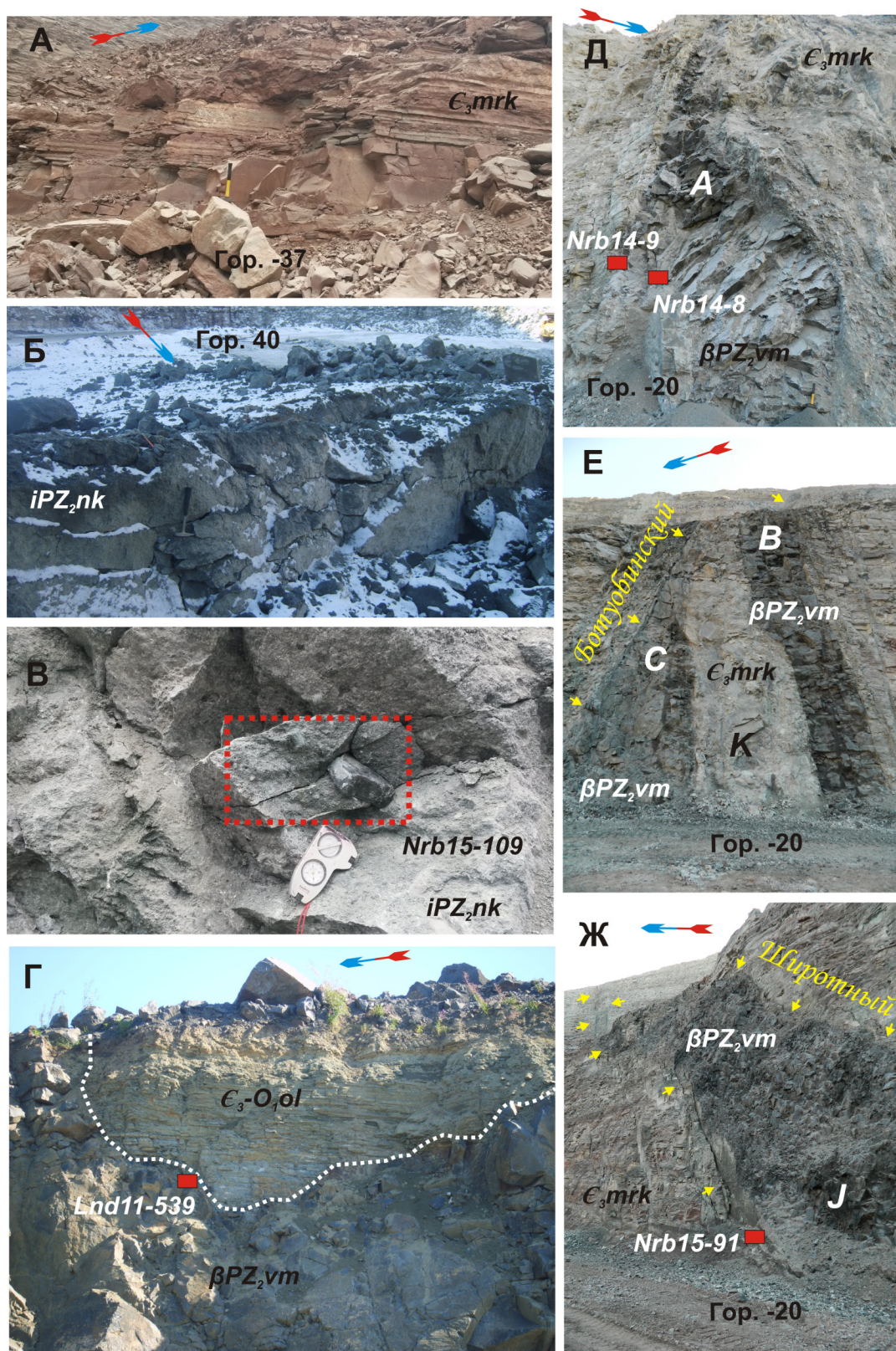


Рис. 4. Объекты исследования: А – алевропесчаники моркокинской свиты; Б – АКБ; В – ксенолит гранито-гнейсов; Г – контакт хонолита долеритов и известняков олдондинской свиты, карьер р. Лиендокит; Д–Ж – дайки долеритов, соответствующие сайтам А, В, С и J (см. рис. 3). Красные прямоугольники – образцы, по которым демонстрируются результаты лабораторных размагничиваний. Фото К.М. Константинова.

Fig. 4. Objects of research: А – aleuritic sandstone of the Morkokinskaya suite; Б – АКБ; В – xenolith of granite-gneiss; Г – contact of dolerite honolite and limestone of the Oldonda suite, quarry at the Liendokit river; Д–Ж – dolerite dikes corresponding to sites А, В, С and J (see Fig. 3). Red boxes show samples used to demonstrate the results of laboratory demagnetization. Photo by K.M. Konstantinov.

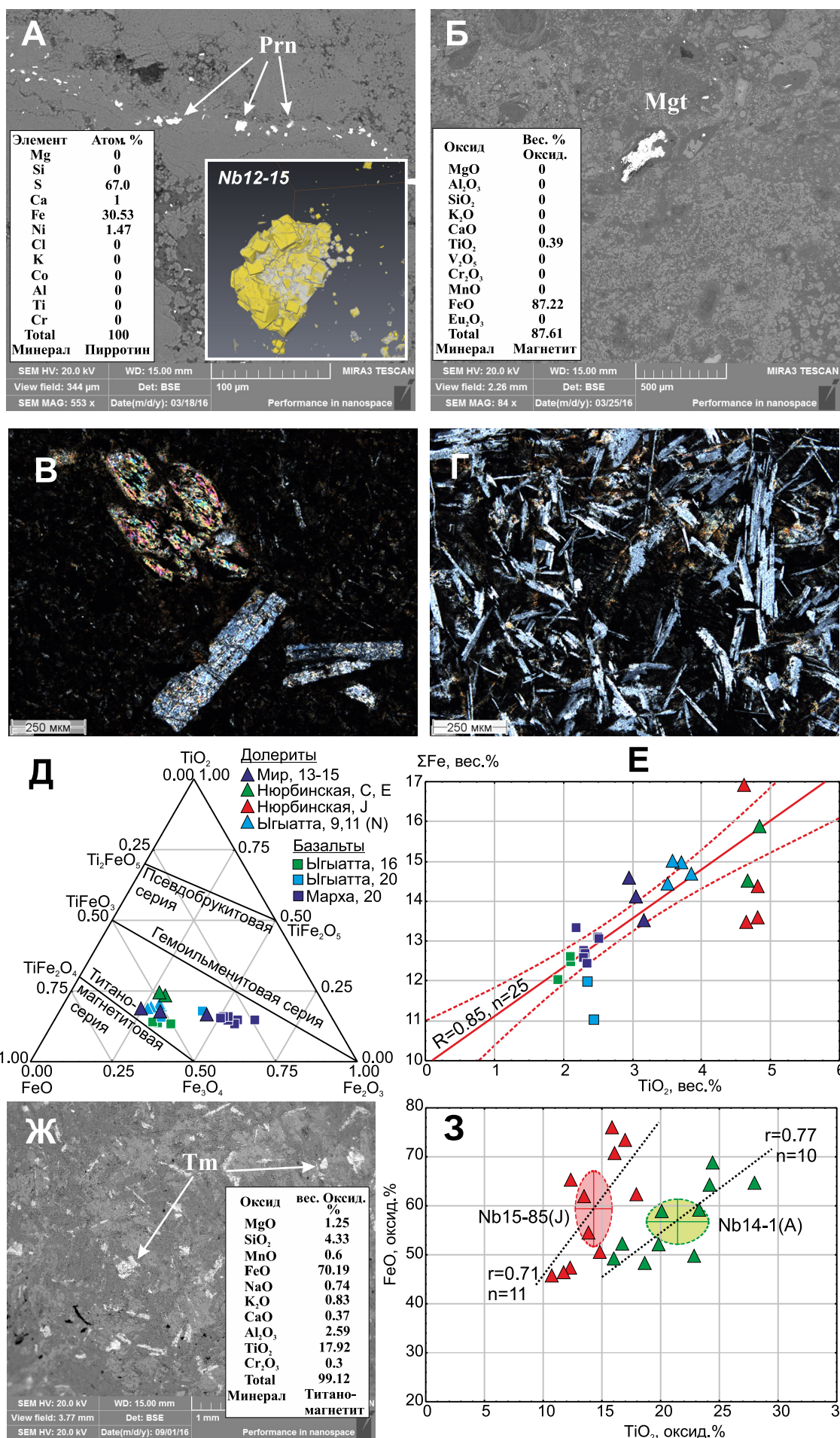


Рис. 5. Геохимические исследования кимберлитов и долеритов трубки Нюрбинской.

Электронно-микроскопические изображения наноструктур и химический состав минералов – носителей намагниченности АКБ (А – обр. nrb15–103; Б – обр. nrb15–118) и долеритов Широкого разлома (Ж – обр. Nb15–85, сайт J); на врезке – фотография сгустка пирита в АКБ (обр. Nb12–15), выполненная по технологии рентгеновской томографии. В и Г – микрофотографии в скрещенных николях образцов долеритов, соответственно, дотрубочной дайки (обр. Nb14–6, сайт А) и дайки Широкого разлома (обр. Nb15–98, сайт J). Д, Е – соответственно, тернарный график по [Akimoto, 1962] и график зависимости FeO–TiO₂ базитов ВМДП; З – график распределения FeO–TiO₂ в титаномagnetитах из долеритов дотрубочной дайки (обр. Nb14–1, сайт А) и дайки Широкого разлома (обр. Nb15–85, сайт J), эллипсы – средние значения с радиусами доверия 95 %, r – коэффициент корреляции, n – число анализов.

Fig. 5. Geochemical studies of kimberlites and dolerites sampled from the Nyurbinskaya pipe.

Electron microscopic images of nanostructures and chemical compositions of minerals – carriers of the AKB magnetization (A – sample nrb15–103; B – sample nrb15–118) and dolerites from the Shirotny fault (Ж – sample Nb15–85, site J). Inset – photo of pyrite concretion in AKB (sample Nb12–15), made by X-ray imaging technology. B and Г – micrographs in crossed nicols of the dolerite samples, respectively, from the pre-pipe dike (sample Nb14–6, site A) and the dike in the Shirotny fault (sample Nb15–98, site J). Д, Е – respectively, the ternary chart after [Akimoto, 1962] and the FeO–TiO₂ curve for basites from the Vilyui–Markha dike belt; З – FeO–TiO₂ distribution curve for titanomagnetites in dolerites sampled from the pre-pipe dike (sample Nb14–1, site A) and dikes in the Shirotny fault (sample Nb15–85, site J). Ellipses – average values (95 % radius of confidence), r – correlation coefficient, n – number of tests.

формированием трубки взрыва. Изменения вмещающих пород, окружающих диатрему, могут отражаться на их структурно-текстурных особенностях и «магнитной памяти». О времени проявления эпигенетических изменений можно судить по тесту «обжига»³, если удастся обнаружить во вмещающих породах векторы ЕОН метакристаллической природы I_n^m .

Песчаники ранней юры укугутской свиты J_{1uk} изучены недостаточно полно, поскольку представляют собой слабосцементированные образования и по этой причине требуют особого подхода к пробоподготовке и измерениям на рок-генераторах.

Петрографические и геохимические исследования образцов выполнены в НИГП АК «АЛРОСА», ИГАБМ СО РАН и ИЗК СО РАН. Минеральный состав пород определялся на микрозонде Camebax-micro, сканирующем микроскопе JSM-6480LM и рентгеновском томографе V/tome/ XS 240 Phoenix GE. Исследования химического состава минералов выполнялись на автоэмиссионном электронном микроскопе высокого разрешения серии TESCAN MIRA 3 LMU [Reed, 2005]. При разделении пород на серии использовалась диаграмма (Na₂O+K₂O–SiO₂) с дискриминантными линиями деления на толеитовые и субщелочные разности (по [McDonald, Katzura, 1964]), субщелочные и высокощелочные (по [Saggerson, Williams, 1964]). На основе тройной диаграммы (FeO–Fe₂O₃–TiO₂) [Akimoto, 1962] базиты, в

зависимости от содержащихся в них ферримангнитных минералов (титаномagnetиты), подразделялись на титаномagnetитовую и гематитовую серии.

Петромагнитные исследования проводились в специализированных лабораториях НИГП «АЛРОСА» ПАО (г. Мирный), ИЗК СО РАН (г. Иркутск) и Казанского федерального университета (г. Казань), оснащенных современной аппаратурой и оборудованием: многофункциональными измерителями магнитной восприимчивости KLY-3s и MFK1-FA, спин-магнитометрами JR-5a и JR-6, размагничивающими установками переменного магнитного поля AF-Demagnetizer и LDA-5 и температурой MMTD80A, коэрцитивными спектрометрами ИКС, термоанализаторами фракций ТАФ-2 и др.

При проведении исследований учитывались отечественные и зарубежные методические разработки по графической и аналитической реализации решений петро- и палеомагнитных задач с использованием компьютерных программ Statistica-6 [Borovikov, 2001], Opal-3 [Vinarsky et al., 1987], Enkin-96 [Enkin, 1994] и Anisoft-42 [Jelinek, 1997].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

Геохимические исследования. Исследования АКБ (рис. 5, А, Б) и долеритов (рис. 5, В, Г, Ж) проводились с целью изучения минералов-носителей намагниченности (МНН). В АКБ диагностируются два ферримангнитных минерала, способных нести магнитную память, – пирротин (магнитный колчедан) и магнетит. Поскольку обнаруженные минералы отличаются по точкам Кюри, соответственно 325 и 575 °С, для определения связанных с ними

³ Тест обжига – способ оценки палеомагнитной надежности, заключающийся в совпадении направлений I_n или стабильной ее компоненты магматической породы и обожженной ею в экзоконтакте вмещающей породы и отличие от направления I_n или стабильной компоненты вмещающей породы вдали от зоны обжига [Pechersky, Sokolov, 2010].

характеристических компонент векторов ЕОН наиболее информативной будет методика пошагового терморазмагничивания.

МНН даек долеритов относятся к титаномagnetитовой серии (рис. 5, Д), причем по среднему содержанию оксида титана TiO_2 ($\approx 4.8\%$) долериты из карьера Нюрбинского превышают другие ранее изученные базиты ВМДП (рис. 5, Е). Но если дотрубочные долериты и долериты Широ́тного разлома практически близки между собой по среднему содержанию оксидов титана и железа ($\Sigma Fe \approx 14.5\%$), то собственно титаномagnetиты (рис. 5, Ж) этих двух объектов значимо отличаются по TiO_2 – у первых среднее содержание этого элемента ≈ 22 оксид. %, что выше вторых более чем на 5 % (рис. 5, З).

Петрофизические исследования. Получен спектр значений петрофизических параметров СВК, слагающих месторождение трубка Нюрбинская (табл. 1). СВК-1, к которому относятся вмещающие породы карбонатного цоколя раннего палеозоя – алевропесчаники и известняки моркокинской E_3mrk и олдондинской E_3-O_1ol свит (см. рис. 3, рис. 4, А, Г), характеризуется объемной плотностью $\sigma = 2486 \pm 37$ кг/м³, магнитной восприимчивостью $\chi < 10 \cdot 10^{-5}$ СИ и $I_n < 5 \cdot 10^{-3}$ А/м (т.е. является практически немагнитным). Фактор Q варьируется в достаточно широких пределах – от 0.04 до 0.83. Направления векторов ЕОН сгруппированы в северных румбах D_{cp} от 335 до 10° с наклонениями $J_{cp} \approx 45^\circ$. В зонах «обжига» с кимберлитами наклонения становятся более пологими, вплоть до отрицательных ($J_{cp} = -23^\circ$).

СВК-2 – АКБ на́кынского интрузивного комплекса iPZ_{2nk} (см. рис. 4, Б, В), характеризуется $\sigma = 2384 \pm 19$ кг/м³, $\chi < 50 \cdot 10^{-5}$ СИ и $I_n < 10 \cdot 10^{-3}$ А/м (т.е. является слабомагнитным), фактор Q от 0.20 до 0.92 (табл. 1). С глубиной значения магнитных параметров немного увеличиваются, но эти изменения определены, прежде всего, уменьшением воздействия процессов выветривания. Существенных изменений намагниченности АКБ, характерных для метасоматических процессов в результате внедрения поздних крупных магматических объектов (см. рис. 2), не установлено. Векторы ЕОН также сгруппированы в северных румбах D_{cp} от 350 до 10° с отрицательными наклонениями J_{cp} от –10 до –50°. Отдельная статистика по физическим свойствам ксенолитов (см. рис. 4, В) не велась.

СВК-3 – долериты вилу́йско-мархинского интрузивного комплекса βPZ_{2vm} . В пределах месторождения трубка Нюрбинская и на его флангах изучены дотрубочные дайки (см. рис. 3, рис. 4, Д, Е), которые рвутся АКБ, а также хонолит р. Лиендокит (см. рис. 4, Г), дайки Широ́тного (см. рис. 4, Ж) и Южного разломов (см. рис. 1, В). Дотрубочные до-

лериты из сайтов А, В, С, D1, D2 и Е обладают повышенными средними значениями $\sigma = 2903 \pm 34$ кг/м³, $\chi = 710 \cdot 10^{-5}$ СИ, $I_n = 456 \cdot 10^{-3}$ А/м и фактора $Q = 1.31$ (табл. 1, п. 24). Несмотря на существенные вариации значений χ и I_n коэффициент корреляции r между ними составляет 0.99. По фактору Q дотрубочные дайки заметно отличаются от ранее изученных долеритов позднего девона (фран-фамен) обнажений рек Марха, Ыгыатта и др. с фактором $Q < 0.8$ [Kravchinsky et al., 2002; Konstantinov, Stegnitskii, 2012; Konstantinov, 2014]. При этом среднее направление группировки векторов ЕОН имеет склонение $D_{cp} \approx 3^\circ$ и наклонение $J_{cp} \approx 0^\circ$. Температурное воздействие АКБ на дотрубочные дайки не зафиксировано, поскольку направления векторов ЕОН сайта А такие же, как и у других сайтов, изученных на более удаленных расстояниях от контакта.

Сайт F, скорее всего, является композиционным, возможно, состоит из разных горных пород (например, дотрубочных долеритов, туфов и пр.). В целом для него характерны относительно пониженные $\sigma = 2739 \pm 33$ кг/м³, $\chi < 55 \cdot 10^{-5}$ СИ, $I_n < 15 \cdot 10^{-3}$ А/м, $Q = 0.56$ (табл. 1). Однако направления его векторов ЕОН близки к таковым дотрубочных долеритов.

Долериты из сайтов J (Широ́тный разлом), N (Южный разлом) и L (р. Лиендокит), изученные на флангах месторождения (см. рис. 2, 3, 4, Г, Ж), также обладают повышенными значениями плотностных и магнитных параметров, за исключением фактора: $Q < 0.8$ (табл. 1). Для них характерны крутые положительные векторы ЕОН: J_{cp} до 70°. Здесь возможно влияние вязкой компоненты I_n^v .

Очевидно, что изученные долериты по петромагнитным характеристикам принадлежат к разным дайковым роям (фазам) [Mashchak, Naumov, 2004], но к каким конкретно мы без дополнительных геохимических, геохронологических и т.п. исследований пока определить не можем. Однако точно установлено, что дотрубочные дайки долеритов обладают специфическими петромагнитными характеристиками (табл. 1, п. 24). Если рассматривать такие дайки в качестве кимберлитораспределяющих, то особенности их намагниченности можно использовать в качестве маркеров при картировании магниторазведкой перспективных на присутствие кимберлитовых тел участков в составе ВМДП.

СВК-4 представлен слабосцементированными песчаниками укугутской свиты J_{1uk} с низкой плотностью $\sigma = 2071 \pm 119$ кг/м³, $\chi < 55 \cdot 10^{-5}$ СИ, $I_n < 5 \cdot 10^{-3}$ А/м, $Q = 0.15$ (табл. 1).

Магнитотекстурные исследования. Исследования анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) [Tarling, Hrouda, 1993] свидетельствуют, что большинство СВК характеризуются естественными

Т а б л и ц а 1. Спектр плотностных и магнитных параметров СВК Накынского кимберлитового поля
($\varphi=65^{\circ}02'$, $\lambda=117^{\circ}04'$)

Table 1. The range of density and magnetic parameters of SMC in the Nakyn kimberlite field
($\varphi=65^{\circ}02'$, $\lambda=117^{\circ}04'$)

№ пп	Сайт (горизонт)	N	σ (s), кг/м³	n	æ (ε), 10 ⁻⁵ СИ	ln				Q (ε), ед.
						ln (ε), 10 ⁻³ А/м	Dcp, °	Jcp, °	k, ед./α ₉₅ , °	
Перекрывающие породы, СВК-4										
1	Песчаники J _{1uk} (+200)	14	2071 (119)	36	55 (1.18)	4 (1.28)	346	38	41.0/3.8	0.15 (1.10)
Вмещающие породы карбонатного цоколя, СВК-1										
2	Известняки Є ₃ -O _{1ol} (карьер Лиендокит)	38	2543 (18)	99	8 (1.08)	1 (1.13)	355	13	9.3/4.9	0.31 (1.09)
3	Известняки Є ₃ -O _{1ol} (+150)	7	2367 (78)	26	3 (1.18)	0.1 (1.14)	343	43	7.3/11.2	0.05 (1.16)
4	Алевропесчаники Є _{3mrk} (+100...+35)	37	2470 (19)	118	8 (1.07)	1 (1.18)	350	20	6.3/5.6	0.19 (1.14)
5	Алевропесчаники Є _{3mrk} (+55)*	11	2542 (40)	12	12 (1.21)	0.2 (1.43)	7	-6	3.3/28.6	0.04 (1.31)
6	Алевропесчаники Є _{3mrk} (-20)*	8	2358 (31)	21	12 (1.15)	5 (1.45)	351	-26	22.6/6.8	0.83 (1.40)
7	Алевропесчаники Є _{3mrk} (-20)	8	2475 (42)	16	9 (1.52)	2 (1.65)	335	28	6.4/15.8	0.51 (1.22)
8	Алевропесчаники Є _{3mrk} (-30...-35)	12	2514 (30)	22	8 (1.45)	1 (1.44)	346	39	9.5/10.1	0.31 (1.21)
9	Алевропесчаники Є _{3mrk} (-25...-40)*	12	2616 (35)	24	17 (1.08)	2 (1.24)	344	6	9.0/10.5	0.27 (1.20)
10	Сводное (2-9)	135	2486 (37)	338	10 (1.22)	2 (1.33)	-	-	-	0.31 (1.22)
Автолитовые кимберлитовые брекчии накынского интрузивного комплекса, СВК-2										
11	АКБ tD ₃ -C _{1nk} (+55)	33	2336 (13)	152	30 (1.08)	3 (1.16)	8	-18	5.0/5.7	0.20 (1.09)
12	АКБ tD ₃ -C _{1nk} (+35)	44	2354 (19)	182	25 (1.03)	2 (1.13)	2	-27	5.2/5.1	0.20 (1.10)
13	АКБ tD ₃ -C _{1nk} (-20)	15	2422 (28)	40	34 (1.10)	7 (1.24)	356	-45	4.8/11.7	0.42 (1.21)
14	АКБ tD ₃ -C _{1nk} (-35...-40)	27	2351 (17)	73	40 (1.10)	18 (1.15)	2	-19	7.1/6.7	0.92 (1.11)
15	АКБ tD ₃ -C _{1nk} (-57)	12	2455 (18)	62	43 (1.06)	14 (1.13)	4	-12	4.7/9.3	0.66 (1.12)
16	Сводное (11-15)	131	2384 (19)	509	34 (1.07)	9 (1.16)	-	-	-	0.48 (1.13)
Долериты вилуйско-мархинского интрузивного комплекса, СВК-3										
17	A*	8	2919 (19)	20	2649 (1.09)	1714 (1.15)	11.1	-0.4	31.3/5.9	1.32 (1.11)
18	B	10	2859 (86)	21	964 (1.36)	859 (1.50)	3.0	-8.4	17.8/7.7	1.82 (1.14)
19	C	8	2850 (85)	16	285 (1.40)	177 (1.33)	3.0	-1.7	15.0/9.9	1.27 (1.10)
20	D-1	7	2846 (43)	14	206 (1.48)	104 (1.65)	1.6	-15.8	7.8/15.2	1.03 (1.19)
21	D-2	9	3021 (125)	18	431 (1.40)	218 (1.51)	3.1	28.4	4.4/18.6	1.03 (1.14)
22	D (20+21)	16	2944 (74)	32	311 (1.30)	157 (1.38)	2.4	7.9	4.2/14.2	1.03 (1.11)
23	E	5	2922 (21)	10	1607 (1.20)	1160 (1.42)	348.3	1	29.4/9.1	1.47 (1.21)
24	Сводное (17-21+23)	47	2903 (34)	99	710 (1.16)	456 (1.20)	3.0	-0.1	8.6/5.1	1.31 (1.06)
25	F	17	2739 (33)	34	55 (1.07)	15 (1.26)	1	-6	6.6/10.4	0.56 (1.20)
26	Сводное (24+25)	64	2860 (28)	133	370 (1.16)	190 (1.22)	2.0	-2	8.0/4.6	1.10 (1.07)
27	J (разлом Широтный)	17	2990 (121)	36	1998 (1.15)	450 (1.13)	313	68	23.1/5.1	0.46 (1.06)

О к о н ч а н и е т а б л и ц ы 1

E n d o f T a b l e 1

№ пп	Сайт (горизонт)	N	σ (s), кг/м ³	n	$\bar{\epsilon}$ (ε), 10 ⁻⁵ СИ	In				Q (ε), ед.
						In (ε), 10 ⁻³ А/м	Dcp, °	Jcp, °	k, ед./α ₉₅ , °	
28	L (карьер Лиендокит)	29	2932 (9)	41	3430 (1.09)	770 (1.11)	1	61	15.0/8.7	0.46 (1.07)
29	N (разлом Южный)**	23	2939 (6)	51	2825 (1.04)	1015 (1.05)	347	37	17.1/5.0	0.74 (1.07)
30	Сводное (26–29)	133	–	261	–	–	–	–	–	–
31	ВСЕГО	413	–	1144	–	–	–	–	–	–

П р и м е ч а н и е. N – количество штуфов; σ – среднеарифметическое значение объемной плотности; s – ошибка среднего арифметического; n – количество кубиков; $\bar{\epsilon}$, In и Q – средние геометрические значения, соответственно, магнитной восприимчивости, ЕОН и коэффициента Кёнигсбергера (In/Ii); ε – ошибка среднего геометрического; Dcp – среднее склонение; Jcp – среднее наклонение; k – кучность; α₉₅ – угол доверия векторов In с вероятностью 95 %. * – образцы отобраны в контакте с кимберлитами (петромагнитная неоднородность зоны обжига, по [Konstantinov, Gladkov, 2009]). ** – дайка изучена на р. Ыгыатта в обнажениях 9 и 11/10 (см. [Konstantinov et al., 2016b]).

N o t e. N – number of stufes; σ – arithmetic mean bulk density; s – error of the arithmetic mean; n – number of cubes; $\bar{\epsilon}$, In and Q – geometric mean, respectively, of magnetic susceptibility, NRM and Kёnigsberger ratio (In/Ii); ε – error of the geometric mean; Dcp – average decline; Jcp – average inclination; k – grouping; α₉₅ – angle of confidence vectors In (95 % probability). * – samples taken from the contact with kimberlites (petromagnetic heterogeneity of the burning zone after [Konstantinov, Gladkov, 2009]). ** – the dike at the Ygyatta river was studied in outcrops 9 and 11/10 (see [Konstantinov et al., 2016b]).

(первичными) магнитными текстурами – магнитное расслоение соответствует генезису изученных объектов. Это является благоприятным признаком сохранности векторов ЕОН, синхронных изученным СВК. Так, в дайках долеритов четко просматривается «дайковый» тип АМВ – плоскость магнитного расслоения (оси K1 и K2) вертикальная и примерно совпадает с северо-восточным простиранием тел ВМДП (см. рис. 1, Б–Г, рис. 6, А–В). У хонолита долеритов р. Лиендокит тип АМВ близок к «осадочному» – плоскость магнитного расслоения субгоризонтальная (рис. 6, Г), но существенный разброс осей эллипса АМВ свидетельствует о более сложных процессах его формирования. АКБ характеризуются «хаотичным» типом АМВ (рис. 6, Д), что, естественно, определяется сложными процессами формирования кратерных фаций вулканических аппаратов [Konstantinov, 2010]. Во вмещающих породах терригенно-карбонатного комплекса так-

же просматривается «осадочный» тип АМВ (рис. 6, Е), но в отличие от АМВ хонолита магнитное расслоение более контрастное. У алевропесчаников явно преобладает плоскостная анизотропия ($F=1.017>L=1.002$, $T_{cp}=0.746$). В то же время заметные отклонения больших осей K1 и K2 эллипса АМВ от горизонтальной плоскости и наличие фигуративных точек в отрицательной плоскости параметра формы $T<0$ свидетельствуют о влиянии эпигенетических изменений, вероятнее всего связанных с внедрением магматических тел [Konstantinov et al., 2007].

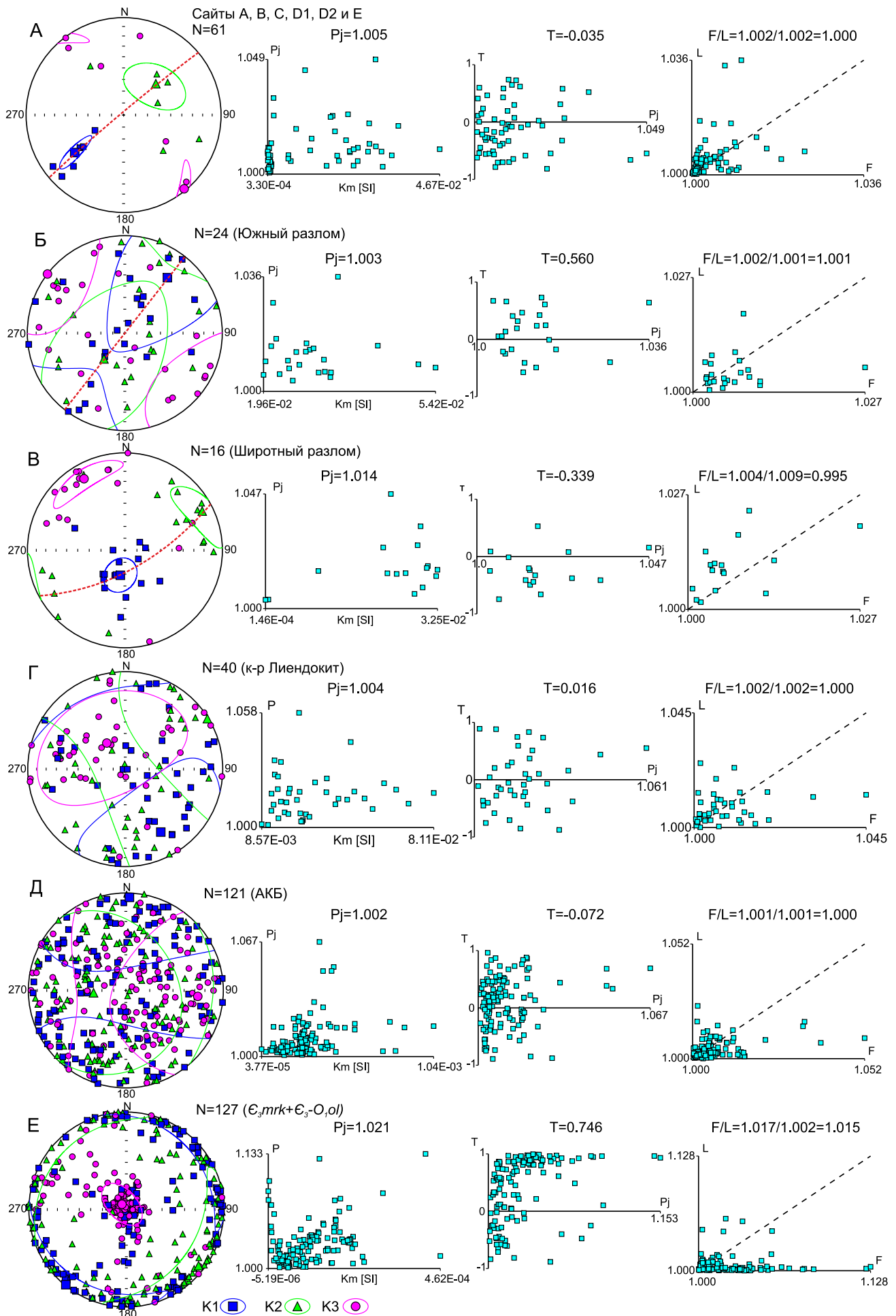
Терромагнитные исследования. Выполненные исследования по магнитной восприимчивости $\bar{\epsilon}$ (рис. 7) в целом согласуются с геохимическими данными. В алевропесчаниках моркокинской свиты (образцы Nb11-44, Nb11-74 и Nb14-43) в качестве МНН выступает гематит с точкой Кюри $T_k>640$ °С. В дайках дотрубочных долеритов (об-

Рис. 6. Магнитотекстурный анализ СВК месторождения трубка Нюрбинская.

А – дотрубочные дайки; Б – дайка Южного разлома; В – дайка Широкого разлома; Г – Лиендокитский хонолит; Д – АКБ; Е – породы карбонатного цоколя. Параметры анизотропии магнитной восприимчивости [Tarling, Hrouda, 1993]: Pj – уточненная степень анизотропии, L – линейная анизотропия, F – плоскостная анизотропия и T – форма эллипса АМВ. Другие пояснения см. в тексте.

Fig. 6. Magnetotextural analysis of the SMC of the Nyurbinskaya pipe.

A – pre-pipe dike; B – dike in the South fault; B – dike in the Shirotny fault; Г – Liendokit honolite; Д – АКБ; Е – carbonate base rocks. Anisotropy parameters of magnetic susceptibility after [Tarling, Hrouda, 1993]: Pj – refined degree of anisotropy, L – linear anisotropy, F – in-plane anisotropy, T – shape of the ellipse AMS. Other explanations in the text.



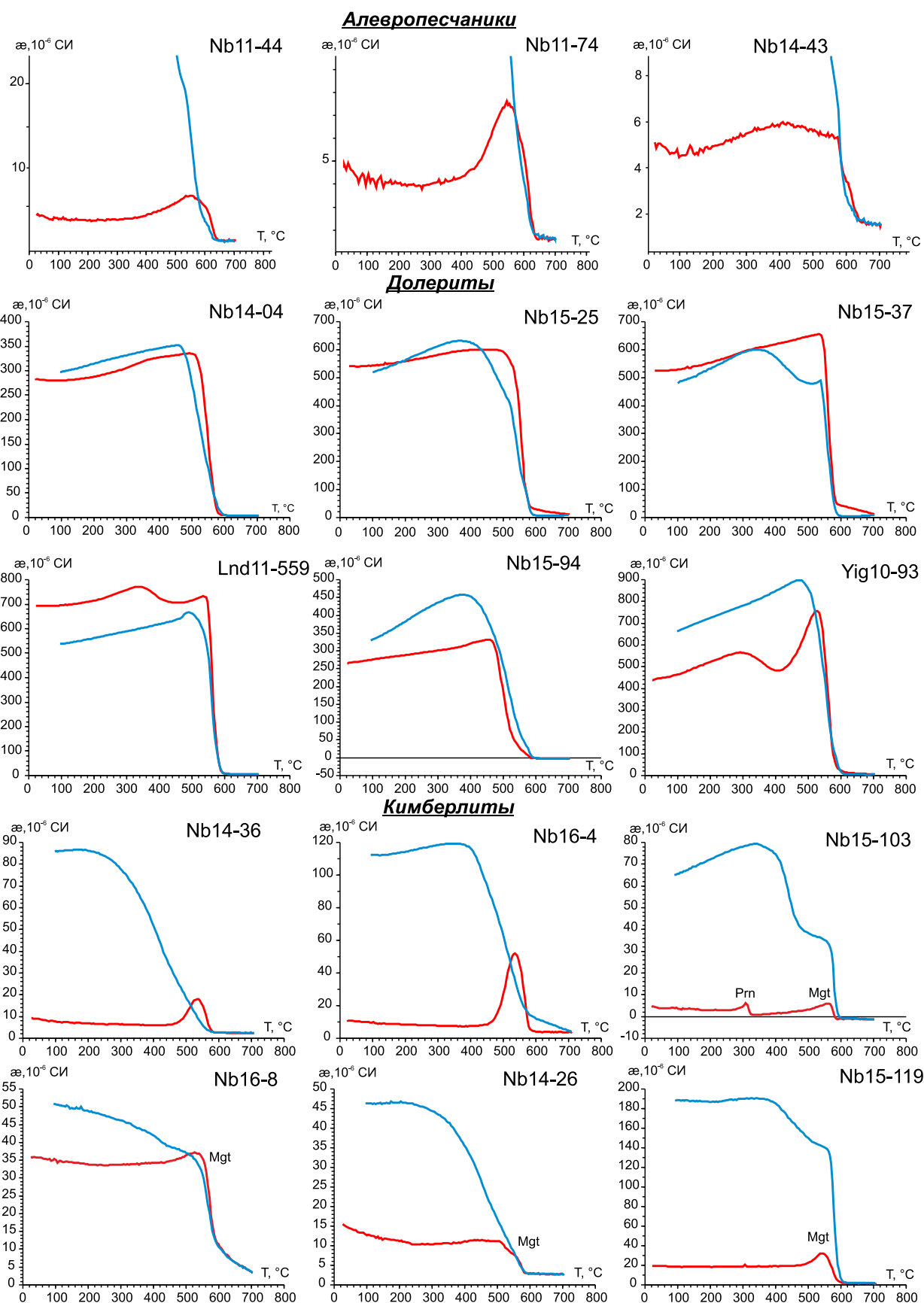
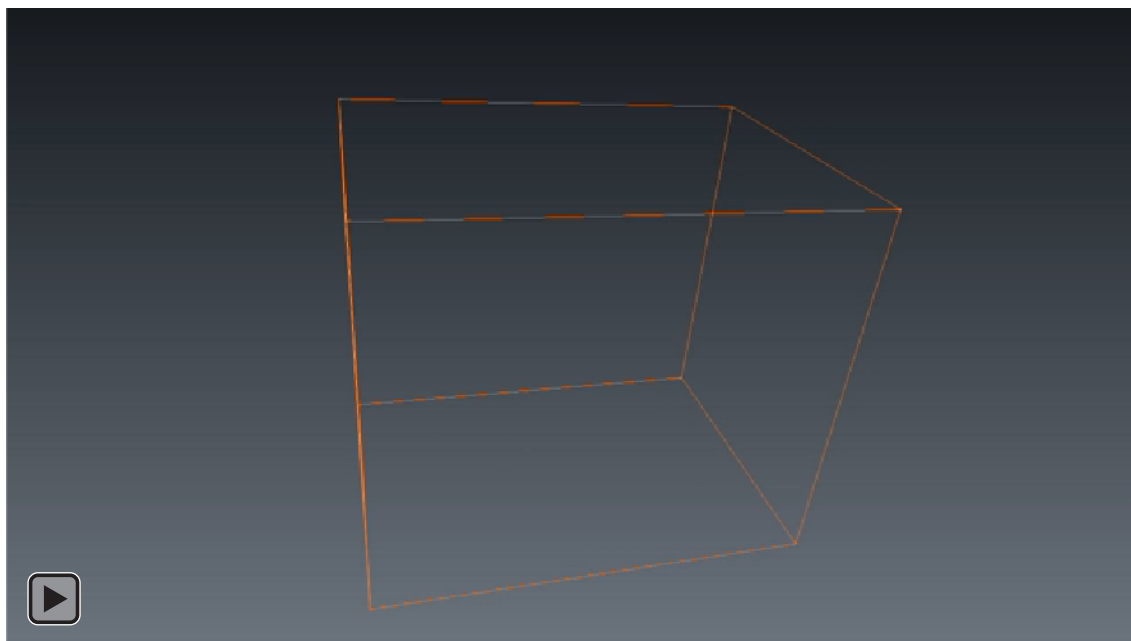


Рис. 7. Термомантограммы магнитной восприимчивости СВК месторождения трубка Нюрбинская (красная/синяя линия – процесс нагрева/охлаждения образца); Prn и Mgt – соответственно, температурные маркеры пирротина и магнетита.

Fig. 7. Termomagnetograms of magnetic susceptibility of the Nyurbinskaya pipe SMC. Red/blue line – heating/cooling of the sample. Prn and Mgt – respectively, temperature markers of pyrrhotite and magnetite.



Видео. Рентгеновская томография кимберлита из трубки Ньюбинская (обр. Nb12–15). Для визуализации кристаллы пирита в объеме образца окрашены в желтый цвет. Для просмотра видео необходимо программное обеспечение Adobe Reader (версия 9 или более поздняя).

Video. X-ray tomography of the kimberlite sample from the Nyurbinskaya pipe (sample Nb12–15). The crystals of pyrite in the sample volume are painted yellow for visualization. The Adobe Reader software (version 9 or later) is required to view the video.

разцы Nb14-4, Nb15-25 и Nb15-37), так же как и в долеритах хонолита (образцы Lnd11-559), дайках Широного (Nb15-94) и Южного (Yig10-93) разломов, МНН является титаномагнетит (см. рис. 5, Д, Ж) с $T_k \approx 570^\circ\text{C}$, близкой к магнетиту. По характеру термомагнитограмм $\chi(t)$ разделение изученных долеритов ВМДП также практически невозможно. Особенно сложно отличить долериты, отобранные в карьере (дотрубочные дайки и дайка Широного разлома), в которых количество ΣFe и TiO_2 примерно одинаково (см. рис. 5, Е). В кимберлитах, согласно геохимическим исследованиям (см. рис. 5, А, Б), основными МНН являются пирротин и магнетит. Присутствие сульфидов в кимберлитах устанавливается по результатам рентгеновской томографии (обр. Nb12-15, видео), а также термомагнитного анализа – на графиках выражается фазовым переходом в магнетит при температурах свыше 480°C (образцы Nb14-36 и Nb16-4). Собственно пирротин обнаруживается на кривой нагрева по пику с $T_k \approx 325^\circ\text{C}$ (обр. Nb15-103). Для магнетитов из АКБ характерны $T_k \approx 580^\circ\text{C}$ (образцы Nb15-103, Nb16-8, Nb14-26 и Nb15-119).

Магнитоструктурные исследования выполнены с целью изучения доменного строения МНН кимберлитов и долеритов (рис. 8, А, Б) [Dunlop, Ozdemir, 1997]. Для кимберлитов эта задача ока-

залась более сложной, поскольку сказывается широкое присутствие в них парамагнитных минералов (рис. 8, А). Истинные параметры гистерезиса АКБ получались после введения поправки за влияние парамагнитного фона. В результате оказалось, что АКБ, за редким исключением, характеризуются пониженными значениями параметров намагниченности насыщения (J_{rs} и J_s) по сравнению с долеритами (рис. 8, В–Е). Последние являются неоднородными по распределению значений гистерезисных параметров: относительно минимальными характеризуются долериты из дайки Широного разлома, а максимальными – долериты дотрубочных даек. Возможно, это определяется разным процентным содержанием в титаномагнетитах оксида титана (см. рис. 5, З) – чем он выше, тем магнитоустойчивее система: высокий фактор Q (табл. 1), гистерезисные параметры (рис. 8, Г, Е, З), сохранность первичных векторов ЕОН и др. В свою очередь, дотрубочные долериты четко разделяются по значениям намагниченности насыщения (J_{rs} и J_s) – пониженными значениями ($J_{rs} < 10 \text{ мАм}^2/\text{кг}$ и $J_s < 0.2 \text{ мАм}^2/\text{кг}$) характеризуются долериты, вероятнее всего, испытавшие контаминацию, о чем свидетельствует обр. Nb14-8 из эндоконтакта сайта А (см. рис. 4, Д). Аналогичные значения J_{rs} и J_s обнаружены и у образцов сайта F, что в комплексе с

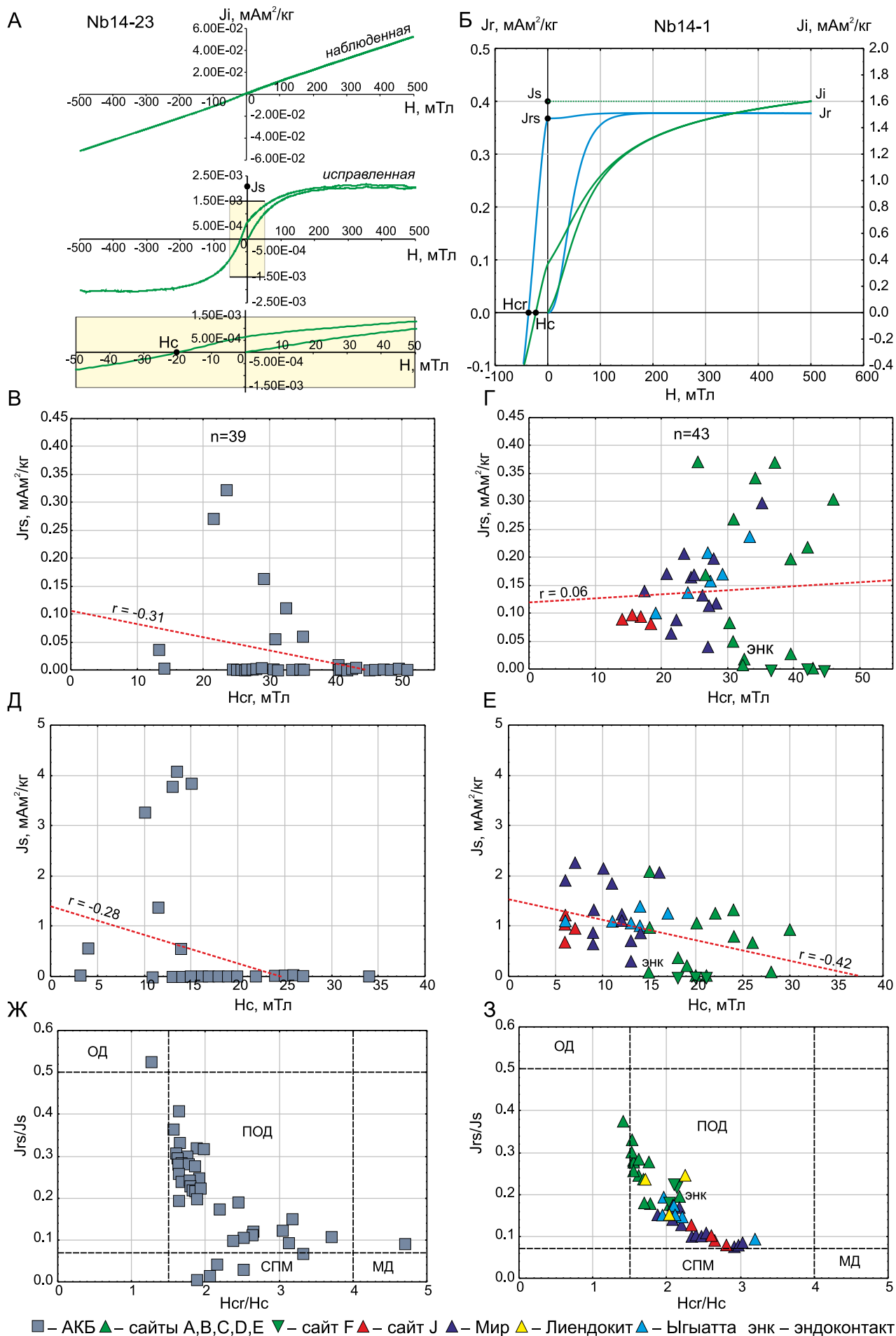


Рис. 8. Магнитоструктурный анализ кимберлитов и базитов месторождения трубка Нюрбинская.

А, Б – магнитный гистерезис по индуцированной (J_i) и остаточной (J_r) намагниченности образцов, соответственно, кимберлитов и дотрубочных долеритов (сайт А). *В–Е* – графики зависимости гистерезисных параметров (остаточная J_{rs} и индуцированная J_s намагниченность насыщения, коэрцитивная сила H_c и коэрцитивная остаточная сила H_{cr}). *Ж, З* – диаграмма Дея–Данлопа [Dunlop, Ozdemir, 1997]: ОД, ПОД, МД и СПМ – области распределения ферримагнитных частиц, соответственно, одно-, псевдоодно-, многодоменная и область, где локализуются образцы с суперпарамагнитными ферромагнетиками. Энк – образец Nb14–8 из эндоконтакта дотрубочной дайки А (рис. 4, Д); r – коэффициент корреляции; n – число анализов. Пояснения см. в тексте.

Fig. 8. Magnetic structure analysis of kimberlites and basites sampled from the Nyurbinskaya pipe.

A, B – magnetic hysteresis from induced (J_i) and residual (J_r) magnetization of the samples, respectively, of kimberlites and pre-pipe dolerites (site A). *B–E* – curves of hysteresis parameters (residual J_{rs} and induced J_s saturation magnetization, coercive force H_c , and coercive residual force H_{cr}). *Ж, З* – Dey–Dunlop diagram [Dunlop, Ozdemir, 1997]: ОД, ПОД, МД – distribution areas of ferrimagnetic particles – respectively, single-, pseudo-single-, multi-domain areas; СПМ – area wherein the samples with superparamagnetic ferromagnets were taken. Энк – sample Nb14–8 from the endocontact of the pre-pipe dike A (see Fig. 4, D); r – correlation coefficient; n – number of tests. Explanations in the text.

петрофизическими данными (табл. 1, п. 25) подтверждает вывод о его композиционной природе.

В АКБ подавляющее большинство фигуративных точек легли в область псевдооднодоменных (ПОД) частиц и только $\approx 10\%$ – в суперпарамагнитную (СПМ) область (рис. 8, Ж). У изученных долеритов все образцы характеризуются ПОД состоянием ферримагнитных частиц (рис. 8, З). Такое доменное строение МНН магматитов является благоприятным условием для постановки палеомагнитных исследований с целью установления в них характеристических векторов ЕОН⁴.

Палеомагнитные исследования включали пошаговые размагничивания переменным магнитным полем и температурой (рис. 9–12) [Zijderveld, 1967; Khramov et al., 1982; Shipunov, 1988; Enkin, 1994]. Поскольку МНН вмещающих пород моркокинской и олдондинской свит позднего кембрия является гематит с $T_k \approx 675^\circ\text{C}$ (см. рис. 7), применялось только температурное размагничивание (см. рис. 9). Как и оказалось, блокирующие температуры характеристической ЕОН близки к этому значению, поэтому соответствующая компонента была обозначена как «гематитовая» – H_m (образцы Ldn11-524t1 и Nrb15-125t2). Вектор H_m имеет пологое направление $J_{sr} \approx 30^\circ$ в северных румбах стереограммы $D_{sr} \approx 340^\circ$ (табл. 2, рис. 13, А). В некоторых образцах алевропесчаников на диаграммах Зийдервельда и графиках $M=f(T)$ в интервале температур от 200 до 500°C просматривается компо-

нента ЕОН, которая условно названа нами «магнетитовой» – M (образцы Nrb14-13t2 и Nrb11-46t2). Ее вектор находится также в северных румбах стереограммы, но имеет отрицательные пологие наклонения $J_{sr} \approx -25^\circ$ (рис. 13, А). Вероятнее всего, природа компоненты M метакристаллическая (наложенная) и может быть связана с внедрением магматических тел (кимберлитов и/или долеритов).

В долеритах дотрубочных даек (сайты А, В – обр. Nrb15-21m1; С, D1 – обр. Nrb15-39t1; D2 и Е), а также в композиционных образованиях (сайт F – обр. Nrb15-78t2) и в зоне экзоконтакта (сайт А, обр. Nrb14-9t2 и сайт К) по результатам комплексных размагничиваний (см. рис. 10) установлена характеристическая компонента ЕОН, обозначенная как «титаномагнетитовая» T_m (табл. 2, рис. 13, Б). Компонента T_m дотрубочных долеритов и связанных с ними образований конформна метакристаллической компоненте M позднекембрийских алевропесчаников (рис. 13, А).

В долеритах из флангов трубки Нюрбинской (сайты J, N и L) обнаружены отличные друг от друга, в т.ч. и от даек дотрубочных долеритов, векторы характеристической ЕОН (см. рис. 11, табл. 2): в L векторы крутые отрицательные (обр. Ldn11-539t2), у J и N пологие положительные, соответственно в западных (образцы Nrb15-96t2 и Nrb15-91m2) и южных (обр. Ygi10-112m1) румбах стереограммы. Важно отметить, что подобные векторы во вмещающих породах позднего кембрия из карьера не наблюдаются.

По данным геохимических (см. рис. 5, А, Б) и термомагнитных (см. рис. 7) исследований в АКБ установлены пирротин и магнетит, что определило ведущую роль терморазмагничивания в их палеомагнитных исследованиях (см. рис. 12). Размагничивание переменным магнитным полем применялось в редких случаях, только в качестве заверки

⁴ Характеристическая остаточная намагниченность I_n^{ch} – наиболее стабильная компонента ЕОН, выделенная в ходе магнитной чистки, на диаграмме Зийдервельда идущая в нуль. Для датировки и оценки природы характеристической остаточной намагниченности необходим комплекс дополнительных исследований, который включает три группы признаков: геологические, физические и геофизические (тесты конгломератов, обжига, обращения и др.) [Pechersky, Sokolov, 2010].

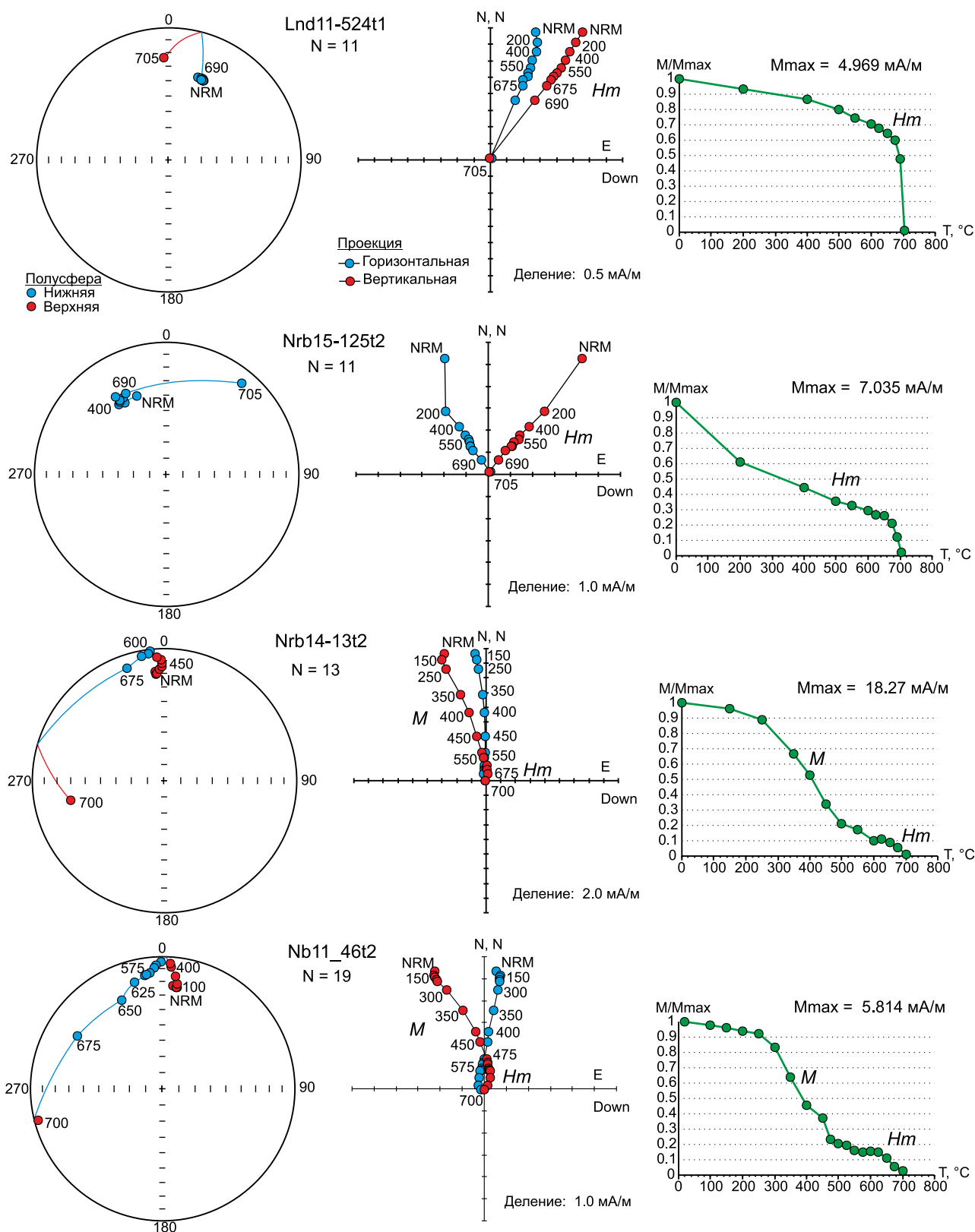


Рис. 9. Примеры размагничивания образцов моркокинской и олдондинской свит месторождения трубка Нюрбинская. Цифры – величина физического воздействия, разрушающего вектор ЕОН (температура или переменное магнитное поле). *Hm*, *M*, *Tm*, *P* и *Ks* – характеристические компоненты ЕОН, соответственно «гематитовая», «магнетитовая», «титаномагнетитовая», «пирротитовая» и «ксенолитовая» (пояснения см. в тексте).

Fig. 9. Demagnetization of the samples from the Morkokinskaya and Oldonda suites, the Nyurbinskaya pipe. Number – value of the physical impact that destructs the NRM vector (temperature or alternating magnetic field). *Hm*, *M*, *Tm*, *P* and *Ks* – respectively, 'hematite', 'magnetite', 'titanomagnetite', 'pyrrhotite', and 'xenolith' characteristic components of NRM (explanations in the text).

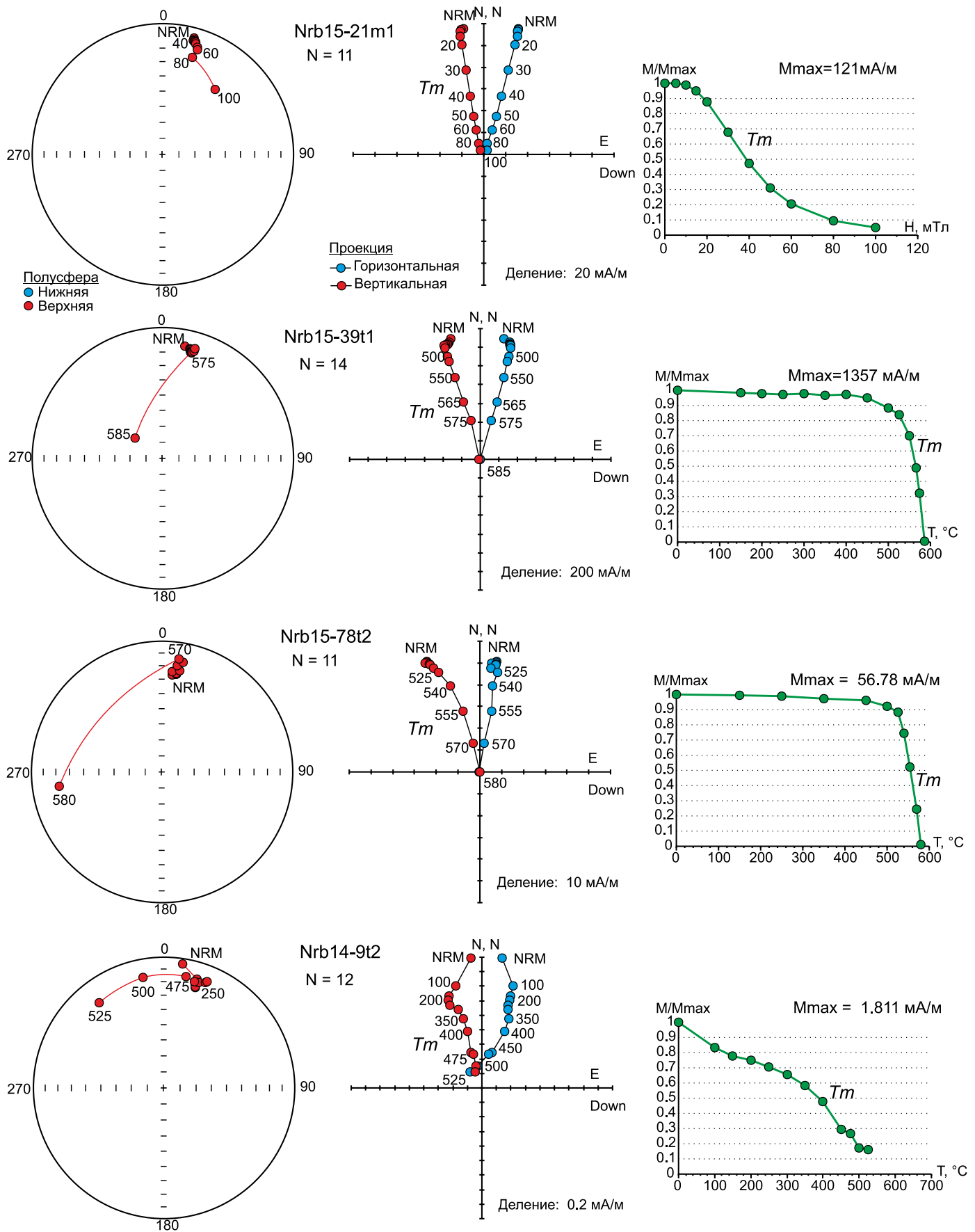


Рис. 10. Примеры размагничивания образцов дотрубочных долеритов месторождения трубка Нюрбинская. Пояснения см. на рис. 9.

Fig. 10. Demagnetization of the pre-pipe dolerite samples from the Nyurbinskaya pipe. Explanations in Fig. 9.

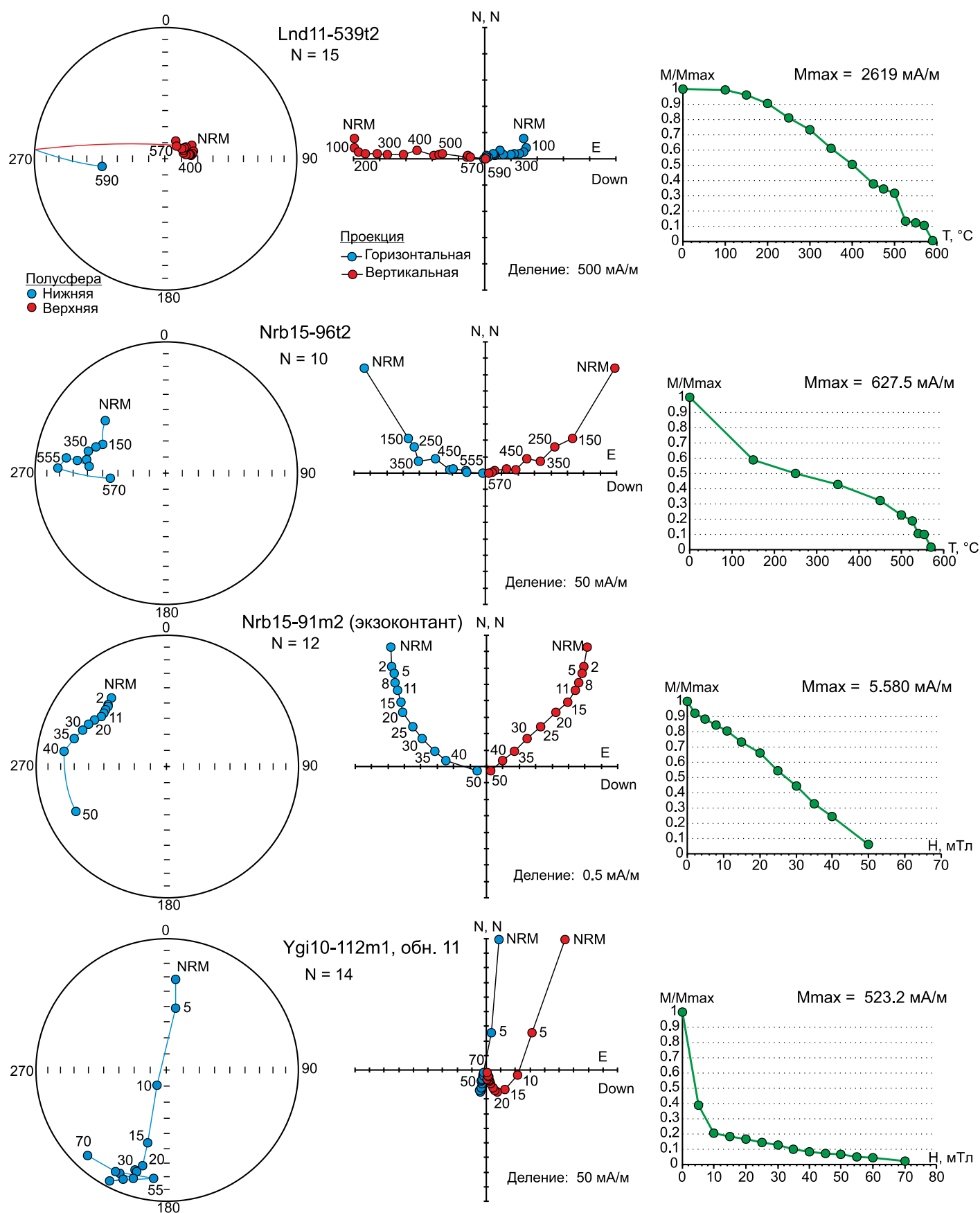


Рис. 11. Примеры размагничивания образцов долеритов ВМДП из флангов месторождения трубка Нюрбинская. Пояснения см. на рис. 9.

Fig. 11. Demagnetization of dolerite samples from the Vilyui–Markha dike belt. The samples were taken on the flanks of the Nyurbinskaya pipe. Explanations in Fig. 9.

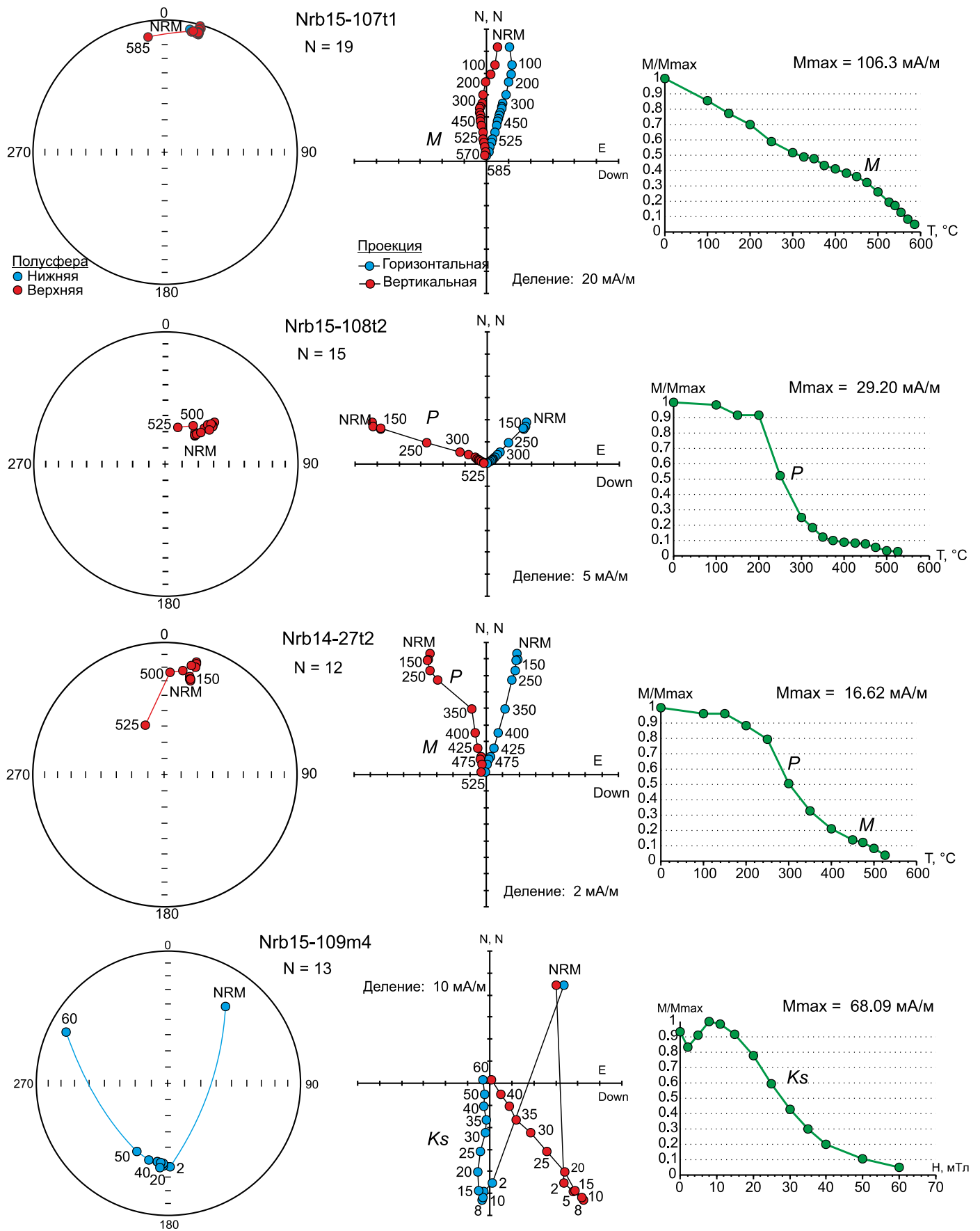


Рис. 12. Примеры размагничивания образцов кимберлитов месторождения трубка Нюрбинская. Пояснения см. на рис. 9.

Fig. 12. Demagnetization of the kimberlite samples from the Nyurbinskaya pipe. Explanations in Fig. 9.

Т а б л и ц а 2. Палеомагнитные направления и полюсы

Table 2. Paleomagnetic directions and poles

№	Тип пород, компонента	N/n	Dcp, °	Jcp, °	k, ед.	α_{95} , °	φ , °	λ , °	dp/dm, °	fm, °
I. Поздний кембрий										
А. Терригенно-карбонатные породы моркокинской ϵ_3mrk и олдондинской ϵ_3-O_{10l} свит										
1	Компонента <i>Hm</i>	1/8	342.3	26.6	18.6	13.2				
2		1/6	351.9	27.9	38.2	11.0				
3		1/9	338.6	12.0	35.6	8.7				
4		1/8	325.1	29.7	32.1	11.8				
5		1/9	336.6	29.1	23.1	11.8				
6	Сводное (1–5)	5/40	339.0	25.3	51.0	10.8	–36	142.3	6.3/11.6	–13
7	Компонента <i>M</i>	1/6	359.5	–23.0	14.3	18.3				
8		1/6	1.1	–37.2	49.6	9.6				
9		1/9	352.5	–22.4	27.6	10.0				
10	Сводное (7–9)	3/21	357.5	–27.6	75.9	14.2	–10.3	119.5	8.5/15.5	15
Б. Алевропесчаники верхоленской свиты ϵ_3vl [Konstantinov et al., 2011]										
11	Сводное по N	4/86	338	14	41.6	14.4	–39	134	7.5/14.7	–7
12	Сводное по R	5/84	159	–5	76.2	8.8	–35	132	4.4/8.8	–3
13	Сводное (11+12)	9/170	159	–9	52.3	7.2	–37	132	3.7/7.3	–5
14	СВОДНОЕ (6+13)	14/210	338.9	14.6	35.7	6.7	–35	136	3.5/6.9	–8
II. Средний палеозой										
А. Автолитовые кимберлитовые брекчии накинского интрузивного комплекса ϵPZ_{2nk}										
15	Компонента <i>M</i>	1/10	18.6	–31.3	10.1	16.0				
16		1/10	349.0	–37.8	9.1	17.0				
17		1/10	22.8	–32.6	18.0	11.7				
18		1/9	359.8	–14.1	45.3	7.7				
19		1/10	4.1	–19.5	9.5	16.5				
20		1/9	19.2	–19.9	11.2	16.1				
21		1/10	8.9	–23.7	16.8	12.1				
22		1/9	2.2	–17.8	21.1	11.5				
23		1/10	10.2	–23.2	18.6	11.5				
24		1/12+2c	7.3	–23.8	9.6	13.6				
25	Сводное (15–24)	10/101	8.2	–24.7	48.7	7.0	–11.8	108.0	4.0/7.5	13
26	СВОДНОЕ (10+25)	13/122	5.8	–25.4	48.7	6.0	–11.5	111.2	3.5/7.5	13
27	Компонента <i>P</i>	1/7	359.4	–50.0	39.0	9.8				
28		1/10	2.4	–56.2	22.7	10.4				
29		1/9	355.6	–56.1	28.0	9.9				
30		1/9	6.0	–57.4	32.8	9.1				
31		1/7+c	357.3	–57.4	31.5	17.1				
32		1/9	9.7	–62.6	48.0	7.5				
33		1/9	356.8	–47.4	25.4	10.4				
34		1/9	341.5	–72.8	22.5	11.1				
35	Сводное (27–34)	8/69	359.3	–57.6	88.4	5.9	13.2	117.6	6.3/8.6	38
Б. Долериты вилюйско-мархинского интрузивного комплекса βPZ_{2vt} и породы междайкового пространства										
36	А, компонента <i>Tm</i>	1/7	3.6	–6.1	51.5	8.5				
37	Е, компонента <i>Tm</i>	1/5	358.1	–10.4	70.3	9.2				
38	В, компонента <i>Tm</i>	1/7	15.2	–11.4	16.9	15.1				
39	С, компонента <i>Tm</i>	1/7	13.0	–5.4	36.3	10.2				
40	D-1, компонента <i>Tm</i>	1/5	4.0	–26.0	22.4	17.0				
41	D-2, компонента <i>Tm</i>	1/7	355.3	–20.5	26.2	12.5				
42	Е, компонента <i>Tm</i>	1/8+c	3.8	–24.1	35.0	8.9				
43	Сводное (36–42)	7/47	4.8	–14.9	53.8	8.3	–17.3	111.8	4.4/8.5	8
44	К, компонента <i>Tm</i>	1/5	0.3	–45.1	7.0	31.0				
45	Сводное (43+44)	8/52	4.4	–18.6	30.1	10.3	–15.4	112.9	5.6/10.7	10
46	J (разлом Широкий)	1/15+c	282.0	52.2	26.2	7.4	34.2	31.8	6.9/10.1	33
47	N (разлом Южный)	1/7+4c	175.5	29.5	33.3	8.2				
48		1/7+4c	176.5	25.1	37.5	7.7				
49	Сводное (47+48)	2/22	176.0	27.3	651.7	9.8	–11.6	118.7	5.8/10.7	15
50	L (карьер Лиендокит),	1/8+5c	325	–43.6	49.7	6.0				
51	компонента <i>P</i>	1/4+6c	346.8	–75.0	23.2	10.6				
52		1/8+2c	338.1	–67.4	35.7	8.3				
53	Сводное (50–52)	3/33	332.8	–62.3	22.6	26.6	20.7	137.7	32.3/41.4	44

Окончание таблицы 2

End of Table 2

№	Тип пород, компонента	N/n	Dcp, °	Jcp, °	k, ед.	α_{95} , °	φ , °	λ , °	dp/dm, °	fm, °
В. Данные по смежным районам [Konstantinov, Stegnitskii, 2012]										
54	р. Кюленкэ, 1-03	1/7	353	-15	41.9	9.4	-16	127	4.9/9.6	8
55	р. Тюнг, 1-04	1/12	348	-22	41.4	6.8	-12	132	3.8/7.2	11
56	р. Тюнг, 5-04	1/18	345	-30	49.7	5.0	-7	134	3.1/5.5	16
57	р. Моркока, 2-00	1/14	181	11	16.7	10.1	-19	115	5.2/10.2	6
58	Сводное (54–57)	4/51	351.7	-19.3	57.1	12.3	-14.8	122.5	6.7/12.8	10
Обобщенные										
59	СВОДНОЕ (35+53)	11/102	353.0	-59.4	43.3	7.0	15	122.5	7.9/10.5	40
60	Сводное (43+58)	11/98	0.1	-16.6	43.3	7.0	-15.5	111.4	3.7/7.2	9
61	Сводное (45+58)	12/103	0.1	-19.0	32.2	7.8	-14.2	111.4	4.2/8.1	10
62	Сводное (49+60)	13/120	359.5	-18.3	45.2	6.2	-15.6	117.5	3.3/6.4	9
63	СВОДНОЕ (49+61)	14/125	359.6	-20.2	35.6	6.8	-14.6	117.4	3.7/7.1	10
Г. Реперные полюсы										
64	Франский ярус*						1.7	92.8	3.7/5.9	26
65	Фамен-турнейский ярус**						11.1	149.7	8.9	31

П р и м е ч а н и е. N/n – количество сайтов/образцов, участвующих в статистике; с – круги перемагничивания. Параметры группировки векторов характеристической ЕОН: склонение – Dcp, наклонение – Jcp, кучность – k и радиус овала доверия – α_{95} . Палеомагнитный полюс: широта – φ , долгота – λ , доверительные интервалы – dp/dm и палеоширота – fm. Палеомагнитные данные по: * – [Konstantinov et al., 2016b], ** – [Kravchinsky et al., 2002]. Красным/синим шрифтом обозначены сайты с обратной/прямой полярностью, принятые для теста обращения.

N o t e. N/n – number of sites/samples involved in the statistics; c – magnetization reversal circles. Parameters for grouping the vectors of the characteristic NRM: declination – Dcp, inclination – Jcp, accuracy – k, α_{95} – radius of the confidence oval. Paleomagnetic pole: latitude – φ , longitude – λ , confidence intervals – dp/dm, paleolatitude – fm. Paleomagnetic data: * – after [Konstantinov et al., 2016b], ** – after [Kravchinsky et al., 2002]. Red/blue – sites with reverse/direct polarity accepted for the conversion test.

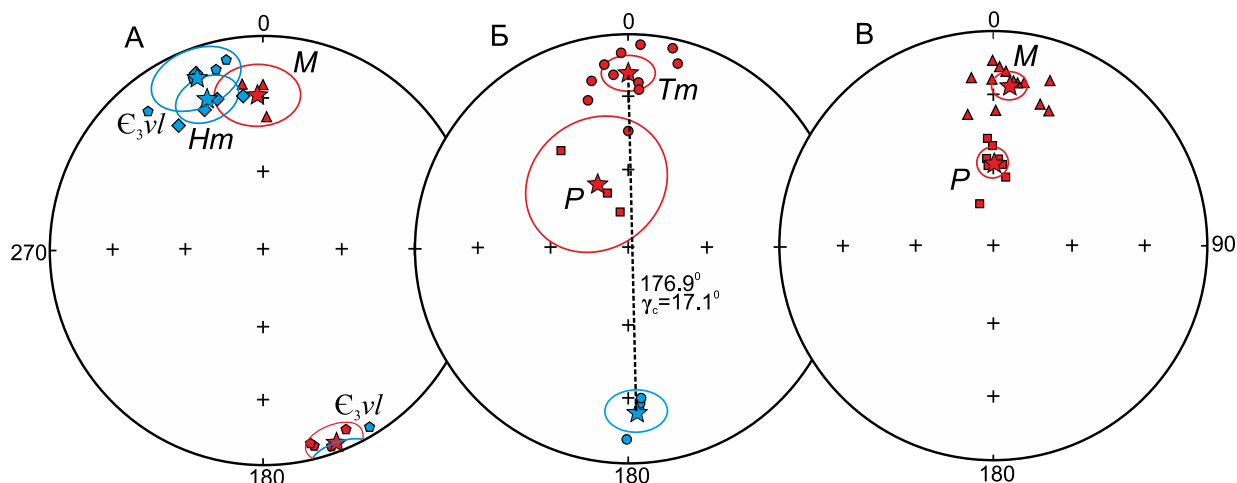


Рис. 13. Результаты компонентного анализа ЕОН вмещающих пород (А), долеритов (Б) и кимберлитов (В) месторождения трубка Нюрбинская.

Фигуративные точки – характеристические компоненты ЕОН: пятиугольник – первичная (седиментационная) компонента In^0 верхолонской свиты, ромб – «гемангнетитовая» компонента Hm моркокинской свиты, кружок – «титаномангнетитовая» компонента Tm дотрубочных даек долеритов, треугольник – «мангнетитовая» компонента M , квадратик – «пирротитовая» компонента P . Красные/синие фигурки – проекции векторов ЕОН на верхнюю/нижнюю полусферы.

Fig. 13. Results of component analysis of NRM of the host rocks (A), dolerites (Б) and kimberlites (В) from the Nyurbinskaya pipe.

Data points – characteristic components of NRM: pentagon – primary (sedimentation) component In^0 of the Verkholsensk suite; diamond – ‘hemagnetite’ component Hm of the Morkokinskaya suite; circle – ‘titanomagnetite’ component Tm of the pre-pipe dolerite dikes; triangle – ‘magnetite’ component M ; box – ‘pyrrhotite’ component P . Red/blue figures – projections of NRM vectors on the upper/lower hemisphere.

результатов Т-чисток. Таким образом, в АКБ были зафиксированы две характеристические компоненты ЕОН (табл. 2): «магнетитовая» M с $T_k \approx 590^\circ\text{C}$ (обр. Nrb15-107t1) и «пирротиновая» P с $T_k \approx 325^\circ\text{C}$ (обр. Nrb15-108t2). Компонента M в АКБ близка компонентам M в алевропесчаниках (рис. 13, А) и Tm дотрубочных долеритов (рис. 13, Б). Статистически разделить их практически невозможно. Компонента P хорошо согласуется с векторами характеристической ЕОН долеритов из хонолита р. Лиендокит (см. рис. 11, обр. Ldn11-539t2, табл. 2, пп. 35 и 53). В некоторых образцах АКБ могут одновременно содержаться обе компоненты (обр. Nrb14-27t2), что свидетельствует о метахронной природе компоненты P . Она развита только в АКБ и отсутствует во вмещающих образованиях (кроме, естественно, пород из экзоконтакта хонолита, см. рис. 4, Г). АКБ практически не испытали существенных пострудных изменений (гипергенных, метасоматических и других процессов), что подтверждают хаотичные направления векторов характеристической ЕОН ксенолитов – «ксенолитовая» компонента Ks (см. рис. 12, обр. Nrb15-109m4).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе проведенных комплексных исследований в СВК месторождения алмазов трубка Нюрбинская установлены следующие статистически представительные характеристические компоненты ЕОН (рис. 13):

- 1) Hm и M в породах позднего кембрия;
- 2) Tm в дотрубочных долеритах;
- 3) M и P в АКБ.

Природа компоненты Hm , вероятнее всего, первичная. Специальных исследований по ней не проводилось, но она соответствует первичным векторам ЕОН алевропесчаников верхолонской свиты $\text{Є}_3\text{vl}$ (табл. 2, п. 13, рис. 13, А) [Konstantinov et al., 2011]. В этом случае возникла благоприятная возможность повысить индекс палеомагнитной надежности (ИПН) реперного палеомагнитного полюса (ПМП) для позднего кембрия Сибирской платформы (табл. 2, п. 14) до максимума – 7 [Van der Voo, 1993] или 1 [Pechersky, Didenko, 1995]. Координаты полюса (рис. 14, А) весьма близки к позднекембрийскому интервалу (500–490 млн лет) траектории кажущейся миграции полюса (ТКМП) Сибири [Torsvik et al., 2012].

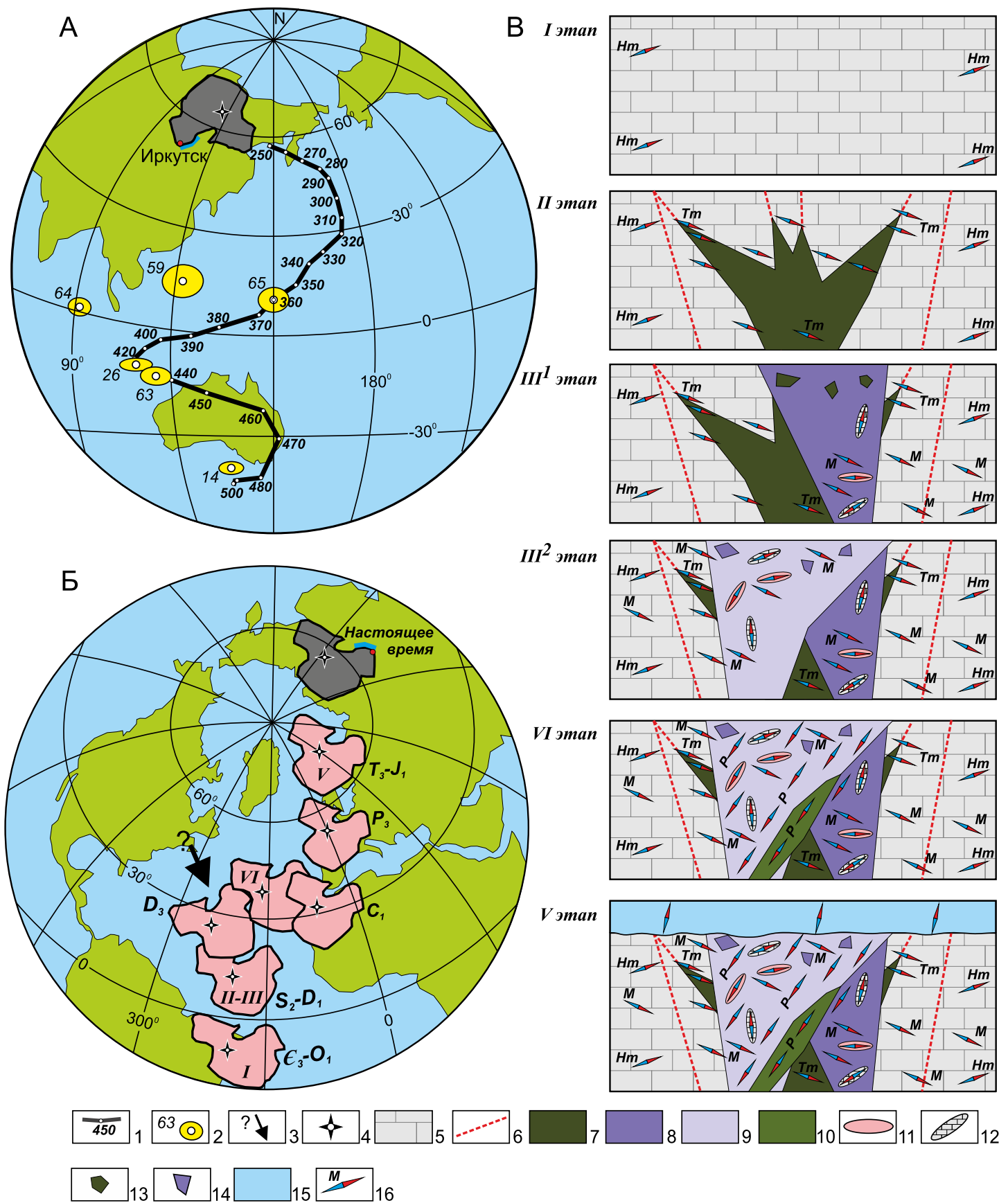
В породах верхнего кембрия компонента M – метахронная (табл. 2, п. 10, рис. 13, А), она могла образоваться за счет внедрения как кимберлитов, так и базитов ВМДП. На эпигенетические изменения вмещающих пород, которые могут быть связаны с наложенными геологическими процессами, также указывают и данные АМВ (см. рис. 6, Е). С каким же из этих двух геологических событий следует связывать компоненту M ? Во-первых, необходимо отметить тот факт, что компонента M обнаружена не только в экзоконтактах магматитов, но и на горизонтах, где дайки долеритов отсутствуют. Во-вторых, в алевропесчаниках (не считая приконтактных зон) не зафиксированы компоненты от других базитовых образований ВМДП (например, дайки Широкого разлома, хонолита и др.). Это с высокой степенью вероятности указывает на то, что компонента M обязана своим появлением мощному стрессу в результате становления трубки взрыва.

Рис. 14. Динамическая ФГМ месторождения трубка Нюрбинская по палеомагнитным данным.

А – палеомагнитные полюсы СВК. Б – палеомагнитные реконструкции Сибирской платформы в фанерозое. В – палеомагнитная схема этапов формирования СВК месторождения. 1 – ТКМП Сибирской платформы по [Torsvik et al., 2012], цифры – геологический возраст в млн лет; 2 – палеомагнитные полюсы (номера согласно табл. 2); 3 – направление движения гипотетического микроконтинента; 4 – положение района исследований; 5 – карбонатный цоколь (моркокинская $\text{Є}_3\text{mrk}$ и олдондинская $\text{Є}_3\text{–O}_{10}\text{l}$ свиты); 6 – разломы ВМДП; 7 – дайки дотрубочных субщелочных долеритов; 8 – ПК; 9 – АКБ; 10 – дайки посттрубочных щелочных долеритов; 11–14 – ксенолиты, соответственно, мантийных и осадочных пород, субщелочных долеритов, ПК; 15 – раннемезозойские алевропесчаники (укугутская свита J_{1uk}); 16 – условные векторы характеристической ЕОН в изученных СВК (см. рис. 13).

Fig. 14. Dynamic PGM model of the Nyurbinskaya pipe based on the paleomagnetic data.

А – paleomagnetic poles of SMC. Б – paleomagnetic reconstructions of the Siberian platform in the Phanerozoic. В – paleomagnetic scheme of the SMC development stages. 1 – ТКМП of the Siberian platform after [Torsvik et al., 2012], numbers – geological age (Ma); 2 – paleomagnetic poles (numbers according to Table 2); 3 – direction of motion of the hypothetical microcontinent; 4 – location of the study area; 5 – carbonate base (Morkokinskaya and Oldonda suites, respectively, $\text{Є}_3\text{mrk}$ and $\text{Є}_3\text{–O}_{10}\text{l}$); 6 – faults of the Vilyui–Markha dike belt; 7 – pre-pipe subalkalic dolerite dikes; 8 – ПК; 9 – АКБ; 10 – post-pipe alkaline dolerite dikes; 11–14 – xenoliths, respectively, of the mantle and sedimentary rocks, subalkalic dolerites, ПК; 15 – Early Mesozoic aleurite-sandstones (Ukugut suite J_{1uk}); 16 – conditional vectors of the characteristic NRM in the studied SMC (see Fig. 13).



Компонента Tm установлена в восьми сайтах, шесть из которых представлены дотрубочными долеритами (табл. 2, п. 45, рис. 13, Б). Ее направление постоянно на разном удалении от контакта кимберлитовой трубки. Учитывая слабое термическое воздействие кимберлитовой трубки на окружающие породы и ксенолиты, высокие физические значения I_n (см. табл. 1) и коэрцитивных параметров (см. рис. 8, Г, Е), дайковый тип АМВ (см. рис. 6, А), а также характер лабораторных размагничиваний (см. рис. 10), трудно представить ее метакхронную природу в долеритах. Магнитожесткое состояние компоненты Tm дотрубочных долеритов, по-видимому, предопределено повышенным содержанием оксида титана TiO_2 в титаномагнетитах (см. рис. 5, З). Тест обращения⁵ [McFadden, McElhinny, 1990] для изученных даек (табл. 2) с прямой ($N=3$, $D_{sp}=177.7^\circ$, $J_{sp}=21.8^\circ$, $k=64.2$) и обратной ($N=11$, $D_{sp}=0.1^\circ$, $J_{sp}=-19.7^\circ$, $k=30.2$) полярностью является положительным: $\gamma/\gamma_c=3.1/17.1$. На этом основании для них был рассчитан ПМП (табл. 2, п. 63, рис. 14, А), который соответствует позднесилурийской – раннедевонской (S_2 – D_1) эпохе тектономагматической активизации [Brahfogel, 1984]. ИПН полюса дотрубочных долеритов составляет 7 [Van der Voo, 1993] или 1 [Pechersky, Didenko, 1995].

Природа компоненты M в АКБ первичная (табл. 2, п. 25, см. рис. 13, В), что доказывается петромагнитными характеристиками (см. табл. 1), тестами «обжига» (см. рис. 9) и «ксенолитов» (см. рис. 12) и другими признаками. С учетом вышесказанного, для расчета ПМП кимберлитов была также задействована метакхронная компонента M алевроитопесчаников (табл. 2, п. 10, см. рис. 13, А). В результате получен ПМП времени внедрения кимберлитов (табл. 2, п. 26, рис. 14, А), который также соответствует позднесилурийской – раннедевонской (S_2 – D_1) эпохе. ИПН полюса кимберлитовой трубки Нюрбинской максимальный.

Компонента P в АКБ – метакхронная (табл. 2, п. 35, см. рис. 13, В), поскольку характеризуется относительно пониженными блокирующими температурами и, самое важное, отсутствует в породах верхнего кембрия. Вероятнее всего, она обязана своим образованием посттрубочной дайке щелочных долеритов [Tomshin et al., 1998, 2004, 2015]. Компонента P обнаруживается и в долеритах хонолита р. Лиендокит – сайт L (табл. 2, п. 53, см. рис. 13, Б). Если исключить возможное перемагничивание долеритов сайта L, то в этом случае можно гово-

рить о синхронности образования посттрубочной дайки и хонолита. Это дает нам основание объединить полученные по ним сайты (табл. 2, пп. 35 и 53) для расчета единого ПМП (табл. 2, п. 59), который может отвечать границе D_3 – C_1 : полюс компоненты P располагается между полюсами аппаинской (франский ярус) и эмаксинской (фамен-турнейский ярус) свит (табл. 2, пп. 64 и 65, рис. 14, А).

Согласно первому принципу палеомагнитологии – «Гипотеза центрального осевого диполя» [Khramov et al., 1982], распределение ПМП (рис. 14, А), рассчитанных по компонентам Hm , Tm , M и P , объясняется перемещениями Сибирской платформы из Южного полушария в Северное (рис. 14, Б). Интерпретация полученных данных позволяет выстроить следующую динамическую ФГМ образования I_n^ch в СВК месторождения трубка Нюрбинская (рис. 14, В) в зависимости от палеогеографического положения Сибирской платформы:

I этап (поздний кембрий – ранний ордовик). В процессе осадконакопления терригенно-карбонатных толщ образуется ориентационная компонента Hm . Значения палеоширот Иркутского амфитеатра составляют $fm=5^\circ$ ю.ш. и НКП – $fm=13^\circ$ ю.ш. (табл. 2, пп. 6 и 13) и согласуются с общепринятым представлением о том, что в это время Сибирская платформа находилась в экваториальном поясе Южного полушария и была развернута своим южным краем к северу.

II этап (поздний силур – ранний девон). Сибирь смещается в экваториальный пояс Северного полушария. Дайки субщелочных базитов ВМДП внедряются в платформенный чехол по рифтовым разломам Вилъюского палеоавлакогена. В это время НКП, согласно установленной в долеритах компоненте Tm , находился на палеошироте $fm=10^\circ$ (табл. 2, п. 63).

III этап (поздний силур – ранний девон). Становление кимберлитовой трубки Нюрбинской (этап III¹ – ПК, этап III² – АКБ) происходит на палеошироте $fm=13^\circ$ с.ш. (табл. 2, п. 26, рис. 14, В), на что указывает компонента M (см. рис. 13, В). Процесс был настолько мощным, что его отголоски зафиксированы в магнитной памяти вмещающих пород в виде метакхронных векторов ЕОН (см. рис. 13, А) и смещения осей эллипса АМВ (см. рис. 6, Е). Небольшая разница между палеоширотами, на которых происходило внедрение дотрубочных даек и кимберлитов, свидетельствует о незначительном промежутке времени между этими двумя событиями (этапами).

IV этап (поздний девон – ранний карбон). Сибирь переместилась в средние широты Северного полушария (рис. 14, Б). Внедрение дайки щелочных базитов (рис. 14, В) и хонолита р. Лиендокит происходило уже на палеошироте $fm=40^\circ$ (табл. 2, п. 59,

⁵ Тест обращения (инверсий, reversal test) – способ выделения и оценки направления древней компоненты I_n по прямо и обратно намагниченным одновозрастным породам одного объекта. Первичная остаточная намагниченность таких пород должна отличаться на 180° .

рис. 14, Б), о чем свидетельствует компонента P (см. рис. 13, Б, В).

V этап (ранний мезозой). Сибирская платформа достигает полярных широт (рис. 14, Б), где формируется запечатывающий трубку терригенный чехол.

Построенная на основе палеомагнитных данных динамическая ФГМ месторождения трубка Нюрбинская (рис. 14, В) более всего удовлетворяет геологической модели (см. рис. 2, Г) [Tomshin et al., 2015].

Средняя скорость Сибирской платформы за рассматриваемый период (от 500 до 360 млн лет) составила около 4 см/год, что не противоречит расчетам другим исследователям [Pechersky, Didenko, 1995]. Однако ее перемещение в девоне, согласно полученным данным, представляется более сложным [Konstantinov et al., 2016b]. В конце девона широтное перемещение резко сменилось на меридиональное (рис. 14, Б). Причиной тому, вероятнее всего, послужило закрытие Палеоазиатского океана в результате коллизионных процессов на юге (в то время северного края) Сибирского кратона [Zonenshain et al., 1990].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе петро- и палеомагнитных исследований СВК месторождения алмазов трубка Нюрбинская получены следующие основные результаты:

1. Во вмещающих породах моркокинской и олдондинской свит позднего кембрия установлены две характеристические компоненты: «гематитовая» Hm и «магнетитовая» M . Компонента Hm с высокой степенью вероятности рассматривается как первичная (седиментационная), поскольку согласуется с первичной ЕОН алевропесчаниках верхоленской свиты Иркутского амфитеатра. На основе этих двух объектов рассчитан ПМП для позднего кембрия (500–490 млн лет) Сибирской платформы: $\Phi = -35^\circ$, $\Lambda = 136^\circ$ и $dp/dm = 3.5/6.9^\circ$. Компонента M – метакронная, вероятнее всего, возникла в результате становления кимберлитовой трубки.

2. Впервые получены данные о петромагнетизме дотрубочных даек ВМДП, которые характеризуются специфическими значениями магнитных параметров (фактор Q , коэрцитивные спектры, векторы ЕОН и др.). Минералами-носителями намагниченности в них служат практически неокисленные титаномагнетиты. В долеритах сохранились первичные векторы ЕОН термоостаточной природы (компонента Tm). По ним рассчитан ПМП $\Phi = -14.6^\circ$, $\Lambda = 117.4^\circ$ и $dp/dm = 3.7/7.1^\circ$, определяющий ниж-

нюю временную границу внедрения кимберлитов не древнее 440 млн лет.

3. Кимберлиты (АКБ) зафиксировали и сохранили две характеристические компоненты: «магнетитовую» M и «пирротитовую» P . Компонента M – первичная, синхронная внедрению кимберлитовой трубки. С учетом того, что эта компонента зафиксирована также и во вмещающих породах моркокинской свиты (п. 1), для этих кластеров рассчитан сводный ПМП ($\Phi = -11.5^\circ$, $\Lambda = 111.2^\circ$ и $dp/dm = 3.5/7.5^\circ$) с максимальным индексом надежности. Природа компоненты P метакронная и может свидетельствовать о воздействии на кимберлиты какого-то пострудного процесса, например внедрения маломощной дайки щелочных базитов. Эту гипотезу необходимо проверить по мере углубления карьера. На этом основании полученный ПМП по компоненте P ($\Phi = 15^\circ$, $\Lambda = 122.5^\circ$ и $dp/dm = 7.9/10.5^\circ$) рассматривается нами в качестве предварительного. Верхняя временная граница внедрения кимберлитов пока может быть оценена не моложе 370 млн лет.

4. Построенная на основе палеомагнитных данных динамическая ФГМ месторождения трубка Нюрбинская доказывает, что процессы внедрения дотрубочных долеритов и кимберлитов протекали практически синхронно. В то же время координаты их ПМП совпадают с ТКМП в интервале 440–420 млн лет, что соответствует позднесилурийской – раннедевонской (S_2 – D_1) эпохе тектономагматической активизации в регионе. Согласно полученным данным, в это время Сибирская платформа располагалась в экваториальном поясе Северного полушария и была развернута своим современным южным краем к северу.

Изучение кимберлитов, базитов и терригенно-осадочных образований в Среднемархинском районе продолжается.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за помощь в работе директору НИГП А.В. Герасимчуку, директору Нюрбинского ГОКа И.А. Уварову, главному геологу Нюрбинского ГОКа В.Г. Мухомлеву, участковым геологам И.В. Дегтяреву, А.Х. Петрову, сотрудникам НИГП В.П. Корниловой, Р.В. Монхорову, сотрудникам ИЗК СО РАН А.С. Гладкову, А.В. Иванову, Д.А. Кошкареву, директору Геологического музея ИГАБМ СО РАН М.Д. Томшину. Совершенствованию работы способствовали замечания рецензентов. Работы ведутся при финансовой поддержке АК «АЛРОСА» (ПАО).

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Agashev A.M., Fomin A.S., Watanabe T., Pokhilenko N.P., 1998. Preliminary age determination of recently discovered kimberlites of the Siberian kimberlite province. In: Extended abstracts of the 7th International Kimberlite Conference. University of Cape Town, Cape Town, p. 9–10.
- Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Tolstov A.V., Polyanchko V.G., Mal'kovets V.G., Sobolev N.V., 2004. New age data on kimberlites from the Yakutian diamondiferous province. *Doklady Earth Sciences* 399 (8), 1142–1145.
- Akimoto S., 1962. Magnetic properties of FeO-Fe₂O-TiO₂ system as a basis of rock magnetism. *Journal of the Physical Society of Japan* 17 (Suppl. B-1.), 84–97.
- Borovikov V.P., 2001. STATISTICA: the Art of Data Analysis on the Computer. For Professionals. Piter, St. Petersburg, 658 p. (in Russian) [Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 658 с.].
- Brahfogel F.F., 1984. Geological Aspects of Kimberlite Magmatism in the Northeastern Siberian Platform. Publishing House of Yakutian Division, Siberian Branch of the USSR Acad. Sci., Yakutsk, 128 p. (in Russian) [Брахфогель Ф.Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1984. 128 с.].
- Cherny S.D., Fomin A.S., Yanygin Yu.T., Kolesnikov G.V., 1998. Geologic structure and composition of kimberlite pipes in the Nakyn field, Yakutian province. In: Geology, placement patterns, methods of forecasting and prospecting of diamond deposits. Mirny, p. 157–159 (in Russian) [Черный С.Д., Фомин А.С., Яныгин Ю.Т., Колесников Г.В. Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Накынского поля Якутской провинции // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. Мирный, 1998. С. 157–159].
- Courtillot V., Kravchinsky V.A., Quidelleur X., Renne P.R., Gladkochub D.P., 2010. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events? *Earth and Planetary Science Letters* 300 (3–4), 239–245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.045>.
- Dunlop D.J., Ozdemir O., 1997. Rock Magnetism. Fundamentals and Frontiers. Cambridge University Press, Cambridge, 573 p.
- Enkin R.J., 1994. A Computer Program Package for Analysis and Presentation of Paleomagnetic Data. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, Sidney, 16 p.
- Gaiduk V.V., 1988. Middle Paleozoic Vilyui Rift System. Yakutian Division, Siberian Branch of the USSR Acad. Sci., Yakutsk, 128 p. (in Russian) [Гайдук В.В. Вилуйская среднепалеозойская рифтовая система. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. 128 с.].
- Gladkov A.S., Koshkarev D.A., Cheremnykh A.V., João F., Karpenko M.A., Marchuk M.V., Potekhina I.A., 2016. Structural-compositional model of the Nyurbinskaya kimberlite pipe formation (Sredne-Markha area of the Yakutian Diamondiferous Province). *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (3), 435–458. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0216>.
- Graham J.W., 1949. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research* 54 (2), 131–167. <https://doi.org/10.1029/JZ054i002p00131>.
- Jelínek V., 1997. Measuring Anisotropy of Magnetic Susceptibility on a Slowly Spinning Specimen – Basic Theory. Agico Print, № 10, Brno, 27 p.
- Kharkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I., 1998. Primary Diamond Deposits in the World. Nedra, Moscow, 555 p. (in Russian) [Харьків А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с.].
- Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevsky S.A., Pogarskaya I.A., Rzhnevsky Yu.S., Rodionov V.P., Slautsitaits I.P., 1982. Paleomagnetology. Nedra, Leningrad, 312 p. (in Russian) [Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитайс И.П. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.].
- Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Ivanov A.V., Egorov K.N., 2014. Middle Paleozoic basaltic and kimberlitic magmatism in the northwestern shoulder of the Vilyui Rift, Siberia: relations in space and time. *Russian Geology and Geophysics* 55 (2), 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.003>.
- Kiselev A.I., Yegorov K.N., Chernyshov R.A., Chashchukhin A.V., Yanygin Yu.T., 2004. The nature of basic explosive breccias within the Nakyn kimberlitic field (Yakutian diamondiferous province). *Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)* 23 (1), 97–104 (in Russian) [Киселев А.И., Егоров К.Н., Чернышов Р.А., Чашухин А.В., Яныгин Ю.Т. Проявления флюидно-взрывной дезинтеграции базитов в Накынской кимберлитовой поле (Якутская алмазоносная провинция) // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 1. С. 97–104].
- Konstantinov I.K., Khuzin M.Z., Konstantinov K.M., 2011. Paleomagnetic studies of rocks of the Upper Cambrian Verkholensk suite (southern Siberian craton). *Nauka i Obrazovanie (Science and Education)* (3), 10–15 (in Russian) [Константинов И.К., Хузин М.З., Константинов К.М. Палеомагнитные исследования пород верхоленской свиты верхнего кембрия (юг Сибирского кратона) // Наука и образование. 2011. № 3. С. 10–15].

- Konstantinov K.M., 1998. The Dynamic Physical-Geological Model of the Baikal Folded Region Based on Paleomagnetic Data. Candidate of Sciences Thesis (Geology and Mineralogy). Irkutsk, 18 p. (in Russian) [Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 1998. 18 с.].
- Konstantinov K.M., 2010. Age of natural residual magnetization of kimberlites from the Yakutian diamondiferous province. *Nauka i Obrazovanie (Science and Education)* (1), 47–54 (in Russian) [Константинов К.М. Возраст естественной остаточной намагниченности кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // *Наука и образование*. 2010. № 1. С. 47–54].
- Konstantinov K.M., 2014. Magnetism of Kimberlites and Trappes in the Junction Zone of the Vilyui and Tunguska Synclines in the Siberian platform. PhD Thesis (Geology and Mineralogy). Irkutsk State University, Irkutsk, 34 p. (in Russian) [Константинов К.М. Магнетизм кимберлитов и траппов зоны сочленения Вилюйской и Тунгусской синеклиз Сибирской платформы: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2014. 34 с.].
- Konstantinov K.M., Gladkov A.S., 2009. Petromagnetic heterogeneities in sintering zones of Permian-Triassic traps of Komsomolsk pipe deposit (Yakutsk diamond province). *Doklady Earth Sciences* 427 (1), 880–886. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09050365>.
- Konstantinov K.M., Ibragimov Sh.Z., Khuzin M.Z., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Artemova E.V., 2015. Paleomagnetic pole of basalts, Appainskaya series: fran frame of the Siberian Platform. In: Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent). Issue 13. Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, p. 122–124. (in Russian) [Константинов К.М., Ибрагимов Ш.З., Хузин М.З., Константинов И.К., Яковлев А.А., Артемова Е.В. Палеомагнитный полюс базальтов аппайнской свиты: репер франа Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 13. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2015. С. 122–124].
- Konstantinov K.M., Ibragimov S.Z., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Artemova E.V., Monkhov R.V., 2016a. Paleomagnetism of pre-kimberlite dykes of dolerites in the Vilyui-Markha fault zone (Yakutian diamondiferous province). *Nauka i Obrazovanie (Science and Education)* (1), 13–20 (in Russian) [Константинов К.М., Ибрагимов Ш.З., Константинов И.К., Яковлев А.А., Артемова Е.В., Монхоров Р.В. Палеомагнетизм докимберлитовых даек долеритов Вилюйско-Мархинской зоны разломов (Якутская алмазоносная провинция) // *Наука и образование*. 2016. № 1. С. 13–20].
- Konstantinov K.M., Ivanyushin N.V., Mishenin S.G., Ubinin S.G., Suntsova S.P., 2004. Petrophysical model of the Komsomolskaya kimberlite pipe. *Geofizika (Geophysics)* (6), 50–53 (in Russian) [Константинов К.М., Иванюшин Н.В., Мишенин С.Г., Убинин С.Г., Сунцова С.П. Петрофизическая модель кимберлитовой трубки Комсомольская // *Геофизика*. 2004. № 6. С. 50–53].
- Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., 2007. Study of petromagnetic inhomogeneities for prospecting of diamond deposits in the Yakutian diamondiferous province. In: Changing geological environment: spatio-temporal interactions between endogenous and exogenous processes. Proceedings of the International Conference (Kazan, 13–16 November 2007). Vol. 2. Kazan State University, Kazan, p. 175–180 (in Russian) [Константинов К.М., Мишенин С.Г., Томшин М.Д. Изучение петромагнитных неоднородностей с целью поисков месторождений алмазов в Якутской алмазоносной провинции // Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: Материалы Международной конференции (г. Казань, 13–16 ноября 2007 г.). Казань: КГУ, 2007. Т. 2. С. 175–180].
- Konstantinov K.M., Stegnitskii Y.B., 2012. The Late Silurian – Early Devonian natural remanent magnetization of kimberlites and traps in the Yakutian diamondiferous province. *Doklady Earth Sciences* 442 (1), 152–158. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12010254>.
- Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Ibragimov Sh.Z., Khuzin M.Z., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Artemova E.V., 2016b. Petro- and paleomagnetic studies of basalts of the Upper Devonian Appainskaya suite (Western Yakutia). *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (4), 593–623 (in Russian) [Константинов К.М., Томшин М.Д., Ибрагимов Ш.З., Хузин М.З., Константинов И.К., Яковлев А.А., Артемова Е.В. Петро- и палеомагнитные исследования базальтов аппайнской свиты верхнего девона (Западная Якутия) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 4. С. 593–623]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0224>.
- Kornilova V.P., Fomin L.S., Zaitsev A.I., 2001. A new type of diamond-bearing kimberlite rocks in the Siberian platform. *Regional'naya Geologiya i Metallogeniya (Regional Geology and Metallogeny)* (13–14), 105–117 (in Russian) [Корнилова В.П., Фомин Л.С., Зайцев А.И. Новый тип алмазоносных кимберлитовых пород на Сибирской платформе // *Региональная геология и металлогения*. 2001. № 13–14. С. 105–117].
- Kostrovitsky S.I., Spetsius Z.V., Yakovlev D.A., Von der Flaass G.S., Suvorova L.F., Bogush I.N., 2015. Atlas of Primary Diamond Deposits in the Yakutian Kimberlite Province. LLC MGT, Mirny, 480 p. (in Russian) [Костровицкий С.И., Спецрус З.В., Яковлев Д.А., Фон-дер-Флаасс Г.С., Суворова Л.Ф., Богущ И.Н. Атлас коренных месторождений алмаза Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: ООО «МГТ», 2015. 480 с.].
- Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V., Savrasov J.I., Valet J-P., Cherniy S.D., Mishenin S.G., Parasotka B.S., 2002. Paleomagnetism of East Siberian traps and kimberlites: two new poles and paleogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma. *Geophysical Journal International* 148 (1), 1–33. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01548.x>.

- Levashov K.K., 1975. Middle Paleozoic rift system of the eastern Siberian platform. *Sovetskaya Geologiya* (Soviet Geology) (10), 49–58 (in Russian) [Левашов К.К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы // Советская геология. 1975. № 10. С. 49–58].
- Masaitis V.L., Mikhailov M.V., Selivanovskaya T.V., 1975. Volcanism and Tectonics of the Patom-Vilyui Aulacogen. Nedra, Moscow, 183 p. (in Russian) [Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Вулканизм и тектоника Патомско-Вилуйского авлакогена. М.: Недра, 1975. 183 с.].
- Mashchak M.S., Naumov M.V., 2004. Middle Paleozoic basite magmatism of the Nakyn kimberlite field and the problem of the age of kimberlites. In: Efficiency of forecasting and prospecting of diamond deposits: past, present and future (DIAMONDS-50). Proceedings of the scientific-practical conference dedicated to the 50th anniversary of the discovery of Zarnitsa, the first diamond pipe. RF MNR, VSEGEI, ALROSA, St. Petersburg, p. 224–226 (in Russian) [Мащак М.С., Наумов М.В. Среднепалеозойский базитовый магматизм Накынского кимберлитового поля и проблема возраста кимберлитов // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (АЛМАЗЫ-50): Материалы научно-практической конференции, посвященной пятидесятилетию открытия первой алмазоносной трубки «Зарница». СПб.: МПР РФ, ВСЕГЕИ, «АЛРОСА», 2004. С. 224–226].
- Matrosov V.A., 2005. Reflection of the Middle Paleozoic magmatism in the magnetic field (case of the Nakyn kimberlite field). In: N.N. Zinchuk (Ed.), *Geology of Diamond – Present and Future*. Voronezh State University, Voronezh, p. 1414–1421 (in Russian) [Матросов В.А. Отражение среднепалеозойского магматизма в магнитном поле (на примере Накынского кимберлитового поля) // Геология алмаза – настоящее и будущее / Ред. Н.Н. Зинчук. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2005. С. 1414–1421].
- McDonald G.A., Katzura T., 1964. Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology* 5 (1), 82–133. <https://doi.org/10.1093/petrology/5.1.82>.
- McFadden P.L., McElhinny M.W., 1990. Classification of reversal test in paleomagnetism. *Geophysical Journal International* 103 (3), 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>.
- Pechersky D.M., Didenko A.N., 1995. The Paleoasian Ocean: Petromagnetic and Paleomagnetic Information on its Lithosphere. UIPE RAS, Moscow, 298 p. (in Russian) [Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 298 с.].
- Pechersky D.M., Sokolov D.D., 2010. Paleomagnetology, petromagnetologiya and geology. Reference Dictionary for neighbors in the specialty. IPE RAS, Moscow (in Russian) [Печерский Д.М., Соколов Д.Д. Палеомагнитология, петромагнитология и геология. Словарь-справочник для соседей по специальности. М.: ИФЗ РАН, 2010]. Available at <http://paleomag.ifz.ru>.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Chernyi S.D., Yanygin Yu.T., 2000. Pyropes and chromites from kimberlites in the Nakyn field (Yakutia) and Snipe Lake district (Slave River region, Canada): evidence for anomalous structure of the lithosphere. *Doklady Earth Sciences* 372 (4), 638–642.
- Reed S.J.B., 2005. Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology. Cambridge University Press, Cambridge, 192 p. [Русский перевод: Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2008. 232 с.].
- Sablukov S.M., Sablukova L.I., Stegnitsky Yu.B., Karpenko M.A., Spivakov S.V., 2008. Volcanic rocks of the Nyurbinskaya pipe: a reflection of the upper mantle state in the region from the Riphean to Carbon, geodynamic consequences. In: Proceedings of VIII international seminar “Deep magmatism, its sources and plumes”. Irkutsk, p. 132–165 (in Russian) [Саблуков С.М., Саблукова Л.И., Стегницкий Ю.Б., Карпенко М.А., Спиваков С.В. Вулканические породы трубки Нюрбинская: отражение состояния верхней мантии региона от рифея до карбона, геодинамические следствия // Труды VIII Международного семинара «Глубинный магматизм, его источники и плюмы». Иркутск, 2008. С. 132–165].
- Saggerson E.P., Williams L.A.J., 1964. Ngurumanite from Southern Kenya and its bearing on the origin of rocks in the Northern Tanganyika alkalin district. *Journal of Petrology* 5 (1), 40–81. <https://doi.org/10.1093/petrology/5.1.40>.
- Shamshina E.A., Zaitsev A.I., 1998. New age of Yakutian kimberlites. In: Extended abstracts of the 7th International Kimberlite conference. University of Cape Town, Cape Town, p. 783–784.
- Shatalov V.I., Tarabukin V.P., Bolanov V.S., Tomshin M.D., 1999. Clarification of the age of kimberlites from the Nakyn field. *Otechestvennaya Geologia* (Russian Geology) (4), 3–4 (in Russian) [Шаталов В.И., Тарабукин В.П., Боланов В.С., Томшин М.Д. Уточнение возраста кимберлитов Накынского поля // Отечественная геология. 1999. № 4. С. 3–4].
- Shipunov S.V., 1988. Identification of components of multicomponent NRM in paleomagnetic studies. In: Paleomagnetism and accretion tectonics. VNIGRI, Leningrad, p. 173–185 (in Russian) [Шипунов С.В. Выделение компонент многокомпонентной естественной остаточной намагниченности при палеомагнитных исследованиях // Палеомагнетизм и аккреционная тектоника. Л.: ВНИГРИ, 1988. С. 173–185].
- Tarling D.H., Hrouda F., 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks. Chapman & Hall, London, 217 p.
- Tomshin M.D., 2000. Features of deep differentiation of basites in the Vilyui paleorift (Siberian platform). In: Petrography at the Turn of the 21st Century. Results and prospects. Vol. I. Syktyvkar, p. 203–205 (in Russian) [Томшин М.Д.

- Особенности глубинной дифференциации базитов Вилюйского палеорифта (Сибирская платформа) // Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Сыктывкар, 2000. Т. I. С. 203–205].
- Tomshin M.D., Fomin A.S., Kornilova V.P., Chernyi S.D., Yanygin Y.T., 1998. Peculiarities of magmatic formations from the Nakyn kimberlite field of the Yakutian province. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 39 (12), 1693–1703.
- Tomshin M.D., Konstantinov K.M., Prokopiev A.V., 2016. Middle Paleozoic Vilyui paleorift and sequence of magmatic events. In: Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from ocean to continent). Issue 14. Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, p. 277–279 (in Russian) [Томшин М.Д., Константинов К.М., Прокопьев А.В. Среднепалеозойский Вилюйский палеорифт и последовательность магматических событий // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 14. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 277–279].
- Tomshin M.D., Travin A.V., Konstantinov K.M., 2015. The sequence of magmatic events within the Nakyn kimberlite field. In: Large igneous provinces, mantle plumes and metallogeny in the Earth's history (Abstract volume) (Irkutsk – Listvyanka, September 1–8, 2015). Publishing House of V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, p. 128–129.
- Tomshin M.D., Zaitsev A.I., Zemnukhov A.L., Kopylova A.G., 2004. The origin of basites in the Nakyn kimberlite field in Yakutia. *Otechestvennaya Geologiya (Russian Geology)* (5), 44–49 (in Russian) [Томшин М.Д., Зайцев А.И., Земнухов А.Л., Копылова А.Г. Характер становления базитов в Накынском кимберлитовом поле Якутии // Отечественная геология. 2004. № 5. С. 44–49].
- Torsvik T.H., van der Voo R., Preeden U., Niocaill C.M., Steinberger B., Doubrovine P.V., van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks R.M., 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews* 114 (3–4), 325–368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.
- Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu., 1989. Integration of Geophysical Methods and Physical-Geological Models. IPI, Irkutsk, 88 p. (in Russian) [Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Комплексирование геофизических методов и физико-геологические модели. Иркутск: ИПИ, 1989. 88 с.].
- Van der Voo R., 1993. Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys, and Iapetus oceans. Cambridge University Press, Cambridge, 411 p.
- Vinarsky Ya.S., Zhitkov A.N., Kravchinsky A.Ya., 1987. Automated System of Paleomagnetic Data Processing OPAL. In: Algorithms and Programs. Vol. 10 (99). VIEMS, Moscow, 86 p. (in Russian) [Винарский Я.С., Житков А.Н., Кравчинский А.Я. Автоматизированная система обработки палеомагнитных данных ОПАЛ // Алгоритмы и программы. Вып. 10 (99). М.: ВИЭМС, 1987. 86 с.].
- Yakovlev A.A., Konstantinov K.M., Ibragimov Sh.Z., Konstantinov I.K., Antonova T.A., Artemova E.V., Monkhov R.V., 2016. Petrographic monitoring of kimberlites of the Nyurbinskaya Pipe (Yakut diamondiferous province). *Nauka i Obrazovanie (Science and Education)* (4), 15–25 (in Russian) [Яковлев А.А., Константинов К.М., Ибрагимов Ш.З., Константинов И.К., Антонова Т.А., Артемова Е.В., Монхоров Р.В. Петромагнитный мониторинг кимберлитов трубки Нюрбинская (Якутская алмазоносная провинция) // Наука и образование. 2016. № 4 (84). С. 15–25].
- Zaitsev A.I., Kornilova V.P., Fomin A.S., Tomshin M.D., 2001. About the age of kimberlite rocks in the Nakyn (Yakutia). In: N.N. Zinchuk, A.D. Savko (Eds.), Problems of diamond geology and some ways for their solution. Voronezh State University, Voronezh, p. 47–54 (in Russian) [Зайцев А.И., Корнилова В.П., Фомин А.С., Томшин М.Д. О возрасте кимберлитовых пород Накынского поля (Якутия) // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения / Ред. Н.Н. Зинчук, А.Д. Савко. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2001. С. 47–54].
- Zaitsev A.I., Smelov A.P., 2010. Isotope Geochronology of Kimberlite Rock Formation of the Yakutsk Province. Offset, Yakutsk, 108 p. (in Russian) [Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск: Офсет, 2010. 108 с.].
- Zemnukhov A.L., Zaitsev A.I., Kopylova A.G., Tomshin M.D., Yanygin Yu.T., 2005. Basite magmatism of the Khannya-Nakyn interfluve. In: N.N. Zinchuk (Ed.), Geology of diamonds – present and future. Voronezh State University, Voronezh, p. 482–494 (in Russian) [Земнухов А.Л., Зайцев А.И., Копылова А.Г., Томшин М.Д., Яныгин Ю.Т. Базитовый магматизм Ханнья–Накынского междуречья // Геология алмаза – настоящее и будущее / Ред. Н.Н. Зинчук. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2005. С. 482–494].
- Zhitkov A.N., 1995. Paleokinematics and pattern of kimberlite fields location on the Siberian platform based on the hypothesis of hot spots. In: Extended abstracts Sixth International kimberlite conference. Novosibirsk, p. 692–694.
- Zijderveld J.D.A., 1967. Demagnetization of rocks, analysis of results. In: D.W. Collinson, K.M. Creer, S.K. Runcorn (Eds.), Methods in paleomagnetism. Elsevier, Amsterdam, p. 254–286.
- Zinchuk N.N., Bondarenko A.T., Garat M.N., 2002. Petrophysics of Kimberlites and Host Rocks. LLC Nedra-Business Center, Moscow, 695 p. (in Russian) [Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 695 с.].
- Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M., 1990. Tectonics of Lithospheric Plates in the USSR Territory. In two volumes. Nedra, Moscow, Vol. 1, 328 p.; Vol. 2, 334 p. (in Russian) [Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. В двух кн. М.: Недра, 1990. Т. 1, 328 с.; Т. 2, 334 с.].



Константинов Константин Михайлович, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией
Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО)
678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел.: 8(411-36)91029; ✉ e-mail: KonstantinovKM@alrosa.ru

Konstantinov, Konstantin M., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory
Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: 8(411-36)91029; ✉ e-mail: KonstantinovKM@alrosa.ru



Яковлев Андрей Андреевич, м.н.с.
Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО)
678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия
e-mail: Yandrey1989@mail.ru

Yakovlev, Andrey A., junior researcher
Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia
e-mail: Yandrey1989@mail.ru



Антонова Татьяна Анатольевна, н.с.
Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО)
678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия
e-mail: AntonovaTA@alrosa.ru

Antonova, Tatiana A., Researcher
Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia
e-mail: ArtemovaEV@alrosa.ru



Константинов Иннокентий Константинович, старший лаборант
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
e-mail: geologiaforever@mail.ru

Konstantinov, Innokentiy K., senior laboratory assistant
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: geologiaforever@mail.ru



Ибрагимов Шамиль Зарифович, канд. геол.-мин. наук, доцент кафедры геофизики
Институт геологии и нефтегазовых технологий
Казанский (Приволжский) федеральный университет
420111, Казань, ул. Кремлевская, 4/5, Россия
Тел.: 89600347640; e-mail: Shamil.Ibragimov@kpfu.ru

Ibragimov, Shamil Z., Candidate of Geology and Mineralogy, assistant professor department of Geophysics
Institute of Geology and Petroleum Technologies
Kazan (Volga Region) Federal University
4/5 Kremlyovskaya street, Kazan 420111, Russia
Tel.: 89600347640; e-mail: Shamil.Ibragimov@kpfu.ru



Артемова Елена Владимировна, инженер
Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО)
678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия
e-mail: ArtemovaEV@alrosa.ru

Artemova, Elena V., engineer
Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia
e-mail: ArtemovaEV@alrosa.ru